



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA, FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES y
HUMANIDADES, Y FACULTAD DEL HÁBITAT

MAESTRÍA INTERDISCIPLINARIA EN CIUDADES SOSTENIBLES

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIUDADES SOSTENIBLES

Evaluación del Impacto a la Calidad del Aire por Fuentes
Móviles en el Trayecto de Zona Industrial de la Carretera 57
en San Luis Potosí

PRESENTA:

Carolina Muñoz López

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Valter Armando Barrera López

ASESORES:

Dr. José Guadalupe Rivera González

Dr. Jonathan Hammurabi González Lugo

Créditos Institucionales

AGRADEZCO a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología
e Innovación (SECIHTI) EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 1324693

MAESTRÍA EN CIUDADES SOSTENIBLES RECIBE APOYO ATRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)

REGISTRO DE LICENCIAS DE PROTECCIÓN INTELECTUAL Y DERECHOS DE AUTOR



Evaluación del Impacto a la Calidad del Aire por Fuentes Móviles en el Trayecto de Zona Industrial de la Carretera 57 en San Luis Potosí © 2026 de Carolina Muñiz López tiene licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivadas 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimientos

Al Dr. Valter Armando Barrera López, mi director de tesis, por su paciencia y acompañamiento a lo largo de la maestría, por compartir generosamente sus conocimientos y por motivarme a seguir preparándome y a buscar siempre la mejor versión de mí mismo.

A mis asesores, Jonathan Hammurabi González y José Guadalupe Rivera, por su orientación, sus valiosas observaciones y el tiempo dedicado para fortalecer este trabajo académico.

A mis compañeros y amigos Diana Barbina, Jazmin Ramírez y Jazmin Rendon que formaron parte de esta etapa tan importante de mi vida, por el apoyo, las experiencias compartidas y el aprendizaje conjunto.

A mis compañeros Andrés Ruiz y Ángel Quiroz Gaspar, quienes contribuyeron de manera activa con sus conocimientos, experiencia y disposición durante el desarrollo de este proceso.

A Juan Pablo López, la amistad más valiosa que me regaló la maestría, por su respaldo incondicional, su compañía en los momentos difíciles demostrando siempre una amistad sincera.

A mi hermano, Miguel Ángel Muñiz, por su respaldo constante y por ser un impulso permanente en mi camino.

A mi madre, Socorro López, quien es el motor de mi vida, y a mi padre, Pablo Aguilar, quienes siempre me han dado lo mejor de sí: su tiempo, amor, esfuerzo y confianza. Sin ustedes nada de esto habría sido posible. Han sido pieza fundamental para alcanzar mis metas y este logro también les pertenece; espero algún día poder retribuirles todo lo que me han brindado.

Las personas que brindaron su apoyo y colaboración en la realización de las entrevistas para el desarrollo de este proyecto de investigación fueron el Arquitecto Enrique García Zermeno, subdirector del Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN) de San Luis Potosí; la Licenciada Jazmín Alejandra Garza Ramírez, directora de Ecología Urbana (SEGAM); el Ingeniero Antonio Zúñiga Ávila, adscrito a la Dirección de Protección Civil del municipio de Villa de Pozos; así como los Ingenieros Martha Sofía González Zago y Eliezer Rachid Gad García Cárdenas, trabajadores de la zona industrial de San Luis Potosí.

Finalmente, agradezco a todas las personas maravillosas que he conocido a lo largo de mi vida, quienes de una u otra forma contribuyeron para que hoy pueda estar aquí.

Contenido

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS.....	11
GENERAL	11
ESPECÍFICOS.....	11
HIPÓTESIS	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1 HISTORIA	12
1.2 ANTECEDENTES	16
1.3 JUSTIFICACIÓN	17
1.4 ANÁLISIS COMPARATIVO: LA CARRETERA 57 COMO EJE DE DESARROLLO EN CIUDADES MEDIAS DEL CENTRO-NORTE	19
1.4.1. CASO I: SANTIAGO DE QUERÉTARO Y LA SATURACIÓN DEL CORREDOR METROPOLITANO.....	19
1.5.2. CASO II: SALTILLO Y RAMOS ARIZPE: EL CLÚSTER AUTOMOTRIZ Y LA VULNERABILIDAD LOGÍSTICA.....	20
2. MARCO CONCEPTUAL	21
2.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y FUENTES MÓVILES	21
2.2 EMISIONES VEHICULARES Y CONTAMINANTES ASOCIADOS.....	25
2.2.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....	25
2.2.2 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x)	26
2.2.3 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)	26
2.2.4 PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS (PM ₁₀ Y PM _{2.5}).....	26
2.2.5 DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) Y OTROS GASES DE EFECTO INVERNADERO	27
2.2.6 OTROS CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS FUENTES MÓVILES.....	27
2.3 MOVILIDAD	28
2.4 RELACIÓN ENTRE CONDICIONES DE OPERACIÓN VIAL Y GENERACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES	29
2.5 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	31
2.6 INVENTARIOS DE EMISIONES.....	32
2.6.1 INVENTARIO DE EMISIONES TEÓRICO.....	32
2.6.2 OTROS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES, SOFTWARE MOVES.....	34
3. METODOLOGÍA	38
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CARRETERA 57	39
3.2 DELIMITACIÓN DE ZONA DE ESTUDIO.....	42
3.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	43
3.4 INVENTARIO DE EMISIONES TEÓRICO A PARTIR DE FACTORES DE EMISIÓN.....	46
3.5 IMPORTANCIA DE LA COMPARACIÓN TEMPORAL 2016–2023	48
3.6 ENCUESTAS ORIGEN DESTINO.....	48
3.7 ENTREVISTAS CON ACTORES INVOLUCRADOS	55

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1 INVENTARIO DE EMISIONES TEÓRICO.	57
4.2 ENCUESTAS A TRABAJADORES DE LA ZONA INDUSTRIAL.....	62
4.3 ENTREVISTAS A ACTORES INVOLUCRADOS EN LA MOVILIDAD DE LA ZONA INDUSTRIAL.....	91
4.3.1 PLANEACIÓN URBANA E INFRAESTRUCTURA DE MOVILIDAD	92
4.3.2 MOVILIDAD Y TRANSPORTE EN LA ZONA INDUSTRIAL.....	92
4.3.3. PERCEPCIÓN DE LOS TRABAJADORES.....	93
4.3.4 SEGURIDAD VIAL, RIESGOS Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS.....	93
4.3.5 CALIDAD DEL AIRE Y EMISIONES POR FUENTES MÓVILES.....	94
4.3.6 SÍNTESIS DE HALLAZGOS.....	94
4.4 ANALISIS ESPACIAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	96
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
5.1 CONCLUSIONES	106
5.2 RECOMENDACIONES.....	107
6. BIBLIOGRAFÍA.....	110

Listado de tablas

Tabla 1. Datos de actividad en metros cúbicos.....	57
Tabla 2. Factores de emisión.	58
Tabla 3. Emisiones año 2023.....	59
Tabla 4. Emisiones año 2016.....	60
Tabla 5. Comparación entre el TDPA y el total de vehículos en el año 2016 y 2023.	60
Tabla 6. Comparación entre las toneladas de contaminantes emitidos en el año 2016 y 2023.....	61

Listado de figuras

Figura 1. Carretera de México.	13
Figura 2. Evolución del área de estudio a través del tiempo años 1984, 2000 y 2020	15
Figura 3. Emisiones atmosféricas por un vehículo motorizado.....	23
Figura 4. Metodología.	38
Figura 5. Capacidad y niveles de servicio de la zona de estudio.	41
Figura 6. Zona de estudio.	43
Figura 7. Zona de estudio y ubicación de puntos de aforo vehicular.....	44
Figura 8. Red de carreteras del estado de San Luis Potosí.....	45
Figura 9. Porcentaje de consumo por tipo de combustible (MET, 2023).....	58

Figura 10. Clasificación vehicular en porcentaje.	61
Figura 11. Rango de edad de los trabajadores encuestados	62
Figura 12. Género de los trabajadores encuestados	63
Figura 13. Ocupación del personal encuestado.	64
Figura 14. Ubicación de domicilio.	66
Figura 15. División de la ciudad por áreas.....	67
Figura 16. Ubicación de centro de trabajo.	69
Figura 17. División de la zona industrial de SLP.	70
Figura 18. Tiempo de traslado casa-trabajo.....	72
Figura 19. Tiempo de traslado trabajo-casa.....	73
Figura 20. Horario de entrada al centro de trabajo.....	74
Figura 21. Horario de salida del centro de trabajo.	75
Figura 22. Hora pico trayecto Glorieta Juárez-Zona industrial.	77
Figura 23. Hora pico trayecto Glorieta Juárez-Zona industrial.	78
Figura 24. Principal medio de transporte.....	79
Figura 25. Medio de transporte adicional.....	80
Figura 26. Gasto diario en transporte por parte de los trabajadores de la zona.	81
Figura 27. Salario promedio (por mes) de los trabajadores de la zona.....	82
Figura 28. Frecuencia de viaje (por semana) casa-trabajo.....	83
Figura 29. Nivel de satisfacción respecto al transporte público disponible en la Zona Industrial.....	84
Figura 30. Cambio de la modalidad de transporte de los trabajadores de la Zona Industrial.....	86
Figura 31. Mapa de nivel de servicio de la zona de estudio.	97
Figura 32. Denué Zona metropolitana de SLP.	99
Figura 33. Mapa de accesibilidad de Zona metropolitana con la zona industrial de SLP.	101
Figura 34. Mapa de flujos de la encuesta realizada.....	103

RESUMEN

El crecimiento industrial y poblacional en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí ha intensificado la movilidad motorizada, generando una presión creciente sobre la infraestructura vial. La Carretera Federal 57, en el tramo que atraviesa la Zona Industrial, se configura como un corredor estratégico para la articulación de flujos urbanos y regionales, al concentrar una elevada proporción de desplazamientos vinculados con actividades productivas, logísticas y laborales.

A partir del análisis comparativo de información oficial sobre volúmenes de tránsito, niveles de servicio y emisiones vehiculares correspondientes a los años 2016 y 2023, se evalúa el impacto de las condiciones de operación del corredor en la generación de contaminantes atmosféricos por fuentes móviles. Los resultados muestran que los segmentos con niveles de servicio deficientes, caracterizados por circulación inestable y velocidades reducidas, incrementan el consumo de combustible y las emisiones por vehículo, lo que repercute directamente en la calidad del aire y en la salud de la población.

El estudio evidencia que la Carretera 57 constituye un área crítica desde la perspectiva de la movilidad urbana y la gestión ambiental, subrayando la necesidad de implementar estrategias integrales que fortalezcan el desempeño vial, promuevan alternativas de transporte sostenible y mitiguen los impactos ambientales asociados al tránsito vehicular.

PALABRAS CLAVE:

Fuentes móviles, Carretera federal 57, Nivel de servicio, Emisiones atmosféricas, Zonas Industriales.

ABSTRACT

Industrial and population growth in the San Luis Potosí Metropolitan Area has intensified motorized mobility, leading to increasing pressure on road infrastructure. Federal Highway 57, along the segment that crosses the Industrial Zone, functions as a strategic corridor for the articulation of urban and regional flows, concentrating a high proportion of trips associated with productive, logistics, and labor activities.

Based on a comparative analysis of official data on traffic volumes, levels of service, and vehicular emissions for the years 2016 and 2023, this study evaluates the impact of the corridor's operating conditions on the generation of atmospheric pollutants from mobile sources. The results indicate that segments with deficient levels of service, characterized by unstable traffic flow and reduced speeds, lead to increased fuel consumption and higher emissions per vehicle, directly affecting air quality and public health.

The findings show that Federal Highway 57 constitutes a critical area from the perspective of urban mobility and environmental management, highlighting the need to implement comprehensive strategies aimed at improving roadway performance, promoting sustainable transportation alternatives, and mitigating the environmental impacts associated with vehicular traffic.

KEYWORDS

Mobile sources, Federal Highway 57, Level of service, Atmospheric emissions, Industrial Zones.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un desafío ambiental significativo que afecta a muchas ciudades alrededor del mundo, y San Luis Potosí no es una excepción. La posición geográfica del estado ha favorecido su desarrollo económico e industrial, particularmente en las últimas décadas, lo que ha implicado una mayor presión sobre la infraestructura urbana y los sistemas de movilidad.

El crecimiento industrial ha propiciado un aumento en la población que se desplaza diariamente hacia la Zona Industrial, lo que a su vez ha incrementado el número de vehículos en circulación. Esta situación ha generado un mayor nivel de congestionamiento en las vialidades que conectan la ciudad con dicha zona, siendo la carretera federal 57 el principal corredor de acceso y uno de los puntos con mayor concentración de tránsito vehicular.

El tránsito vehicular intenso en este corredor tiene efectos directos en la calidad de vida de la población, al traducirse en mayores tiempos de traslado, un mayor consumo de combustible y un incremento en las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Entre las principales fuentes de estos contaminantes se encuentran los vehículos automotores, los cuales emiten sustancias como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas, que pueden generar efectos adversos en la salud humana, tanto de forma aguda como crónica.

En este contexto, el análisis de las emisiones generadas por fuentes móviles adquiere relevancia, particularmente en corredores con alta carga vehicular como la carretera 57. El presente trabajo se enfoca en evaluar el impacto de dichas emisiones en el tramo que atraviesa la Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí, a partir de un cálculo teórico de emisiones y del análisis del tránsito vehicular.

Asimismo, considerando que el inventario de emisiones elaborado en 2016 constituye el último referente estatal disponible, este estudio incorpora una comparación con información actualizada al año 2023, lo que permite analizar la evolución del tránsito y de las emisiones asociadas a las fuentes móviles en la zona de estudio. Complementariamente, se analizan los patrones de movilidad de los trabajadores mediante encuestas origen–destino, con el fin de identificar áreas de oportunidad para la implementación de soluciones de transporte masivo orientadas a mejorar la movilidad urbana y reducir los impactos ambientales asociados.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar el impacto a la calidad del aire por la emisión de gases y compuestos de efecto invernadero y otros contaminantes del aire por fuentes móviles en la carretera 57 en el paso por la zona industrial de la ciudad de San Luis Potosí.

ESPECÍFICOS

- Realizar un cálculo teórico de las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (CYGEI), así como de otros contaminantes del aire, generadas por fuentes móviles en la carretera 57, en su paso por la zona industrial de la ciudad de San Luis Potosí.
- Comparar los resultados obtenidos en el inventario de emisiones del año 2016 elaborado por la UASLP con las estimaciones correspondientes al año 2023, a fin de identificar cambios temporales en los niveles de emisión.
- Identificar y analizar los patrones de movilidad de los trabajadores que se desplazan hacia la zona industrial, mediante la aplicación de una encuesta origen–destino.

HIPÓTESIS

- Es posible evaluar el impacto a la calidad del aire por la emisión de gases y compuestos de efecto invernadero y otros contaminantes del aire por fuentes móviles en la carretera 57 en el paso por la zona industrial de la ciudad de San Luis Potosí con el uso de factores de emisión para proponer alternativas de transporte sostenible y medidas de mitigación.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 HISTORIA

La Carretera Federal 57 constituye una arteria vital que recorre diversos estados de México (ver figura 1), consolidándose como el eje neurálgico que articula los flujos productivos nacionales con el mercado global. Históricamente, su construcción fue fundamental para el desarrollo de la infraestructura vial del país; en la década de 1950, se inició este proyecto con el objetivo de conectar la Ciudad de México con la frontera norte en Piedras Negras, Coahuila. Este esfuerzo formó parte de un plan integral para fortalecer la red de caminos y fomentar el crecimiento económico, fundamentado previamente en la Ley de Vialidad de 1941, la cual buscaba crear conexiones eficientes entre los centros económicos y las zonas rurales (SCT, 1992).

Con el paso del tiempo, San Luis Potosí se transformó en un centro industrial de primer orden gracias a esta conectividad estratégica. A partir de los años 80, el auge de la industria automotriz y manufacturera en la región atrajo inversiones significativas, proceso que fue documentado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). De acuerdo con su Manual Estadístico del Sector Transporte 2010, esta vía ha sido clave para agilizar el traslado de mercancías, permitiendo un movimiento acelerado de materias primas y productos manufacturados que fortalecen tanto la economía regional como la nacional (IMT, 2010). Su ubicación privilegiada la consolidó como la columna vertebral del crecimiento industrial, conectando zonas productivas directamente con corredores de exportación hacia Estados Unidos.



Figura 1. Carretera de México.

Fuente: Mapoteca

En la actualidad, esta relevancia se ha profundizado bajo el dinamismo del T-MEC y la reconfiguración de las cadenas de valor globales. Como señala el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, 2023), este corredor es hoy la arteria de mayor densidad logística del país, funcionando como la pieza maestra que une al Bajío con el mercado norteamericano en un contexto de relocalización de empresas o *nearshoring*. Según diagnósticos de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT, 2022), la Zona Industrial de San Luis Potosí responde a una lógica de accesibilidad estratégica que posiciona al estado en el centro del llamado "Triángulo de Oro" económico de México. Esta condición no solo facilita la distribución de productos terminados, sino que permite la consolidación de un sistema de "puertos interiores", donde la carretera 57 actúa como el cordón umbilical que garantiza el suministro de componentes críticos justo a tiempo para las armadoras y plantas de alta tecnología instaladas en la región.

Sin embargo, esta jerarquía logística ha derivado en una saturación crítica de la infraestructura que amenaza la competitividad de la zona. El tramo potosino enfrenta una compleja superposición de funciones donde el transporte de carga pesada de largo recorrido colisiona directamente con la movilidad cotidiana de miles de trabajadores que se desplazan hacia la Zona Industrial. Esta dualidad operativa genera cuellos de botella que incrementan los costos logísticos y, como advierte el Consejo San Luis Potosí de Logística (2024), transforma al corredor en un punto crítico de vulnerabilidad vial y ambiental. La congestión recurrente no solo compromete el cumplimiento de los contratos de exportación, sino que dispara la generación de emisiones por fuentes móviles en un área densamente poblada. En este sentido, la Carretera 57 trasciende su función original de transporte para convertirse en un espacio de fricción social y operativa, donde la sostenibilidad económica nacional depende ahora de una gestión urbana integral que logre armonizar el imparable motor industrial con la seguridad vial y la calidad de vida de los habitantes de la región.

En la figura 1.2 se muestra la evolución del área de estudio en los años 1984, 2000 y 2020. A partir de esta comparación se observa la transición de una zona con baja densidad poblacional hacia un entorno con mayor concentración urbana e industrial, proceso asociado principalmente a la instalación progresiva de parques industriales y al crecimiento de las actividades productivas en la región. Cabe señalar que la imagen correspondiente a 2020 constituye la información más actualizada disponible para este análisis, por lo que permite representar el estado reciente del desarrollo territorial en la zona de estudio.



Figura 2. Evolución del área de estudio a través del tiempo años 1984, 2000 y 2020 respectivamente.

Fuente: Google Earth

1.2 ANTECEDENTES

El crecimiento urbano actual que se vive en las ciudades medias en Latinoamérica es el reflejo de un proceso de urbanización que se ha manifestado desde mediados del siglo XX, este proceso se presenta en la expansión física de las manchas urbanas, teniendo como consecuencia, urbanización y un desarrollo socioeconómico (Gutiérrez, 2012). En los últimos años San Luis Potosí ha tenido un crecimiento considerable en la densidad demográfica, este fenómeno se ha presentado principalmente por el crecimiento industrial y las buenas oportunidades laborales que hay en la ciudad. Este crecimiento ha traído deterioro ambiental, procesos de contaminación y la creciente necesidad de modelos de desarrollo acelerados. El incremento poblacional es reflejado en el proceso de crecimiento de áreas periurbanas, lo que lleva a daño ambiental (Rodríguez et al., 2011). Una de las formas en la que este problema se manifiesta es provocando contaminación atmosférica en las ciudades.

Este es uno de los principales problemas ambientales y de salud pública de México y del mundo. Es un fenómeno inherente al estado económico, poblacional y tecnológico de nuestro país, que tiene sus expresiones más graves en las grandes ciudades y las zonas fronterizas e industriales del territorio nacional (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018).

El crecimiento poblacional ha traído beneficios económicos a la ciudad, sin embargo, también representa un mayor consumo de recursos como combustibles fósiles, los cuales son utilizados en los vehículos que transportan al personal a sus zonas de trabajo. Estos vehículos están considerados dentro de las fuentes móviles que son todas aquellas que se desplazan de forma autónoma y que a su paso van emitiendo contaminantes a la atmósfera (Agencia de Protección Ambiental, 2016). Dentro de las fuentes móviles se encuentran los automóviles, autobuses, aviones, entre otros.

Como definición la contaminación atmosférica hace referencia a la presencia de contaminantes en el aire ya sea en forma de pequeñas partículas o en productos secundarios gaseosos. Estos contaminantes, al estar presentes en concentraciones que superan los niveles naturales, representan riesgos, daños y molestias para la salud de las personas, así como para las plantas y los animales que habitan el área afectada. Los contaminantes atmosféricos pueden ser liberados directamente al aire desde fuentes puntuales como fábricas y vehículos, o formarse en la atmósfera a través de reacciones químicas entre diferentes precursores (Agencia de Protección Ambiental, 2020).

La contaminación del aire en San Luis Potosí proviene de múltiples fuentes. El transporte vehicular es uno de los principales contribuyentes. La creciente flota de automóviles, camiones y autobuses emite grandes cantidades de contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Según un informe del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el sector del transporte es responsable de una gran parte de las emisiones de NO_x y PM_{2.5} en la ciudad (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018).

1.3 JUSTIFICACIÓN

La contaminación del aire es de los problemas ambientales actuales más graves en todo el mundo. Está presente en todas las sociedades, no importa el nivel de desarrollo socioeconómico con el que cuenten, y es de alta importancia debido a que afecta principalmente la salud de la población (Romero et al., 2004). Con el crecimiento de las ciudades se va generando mayor contaminación en todos los ámbitos, lo que lleva a tener afectaciones en el entorno incluyendo la calidad del aire.

San Luis Potosí ha tenido un incremento industrial considerable en los últimos años según el Indicador Mensual de la Actividad Industrial por Entidad Federativa (IMAIEF), la industria manufacturera creció 8.4 % respecto al mismo mes del año anterior (IMAIEF, 2023). Lo cual ha provocado que también el incremento poblacional se vea afectado. De acuerdo con el censo de población 2020 del INEGI, la población en el municipio de San Luis Potosí ha incrementado en un 18% en comparación con 2010 presentando un total de 911,908 habitantes (48.3% hombres y 51.7% mujeres) (Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública, 2023). Esto repercute en un mayor consumo de recursos y sobre todo mayor contaminación.

De acuerdo con datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), actualmente existen 520 empresas manufactureras asentadas, en un radio aproximado de tres mil 800 hectáreas incluyendo la zona de aglomerado con el municipio de Villa de Reyes. La fuerza productiva es de aproximadamente 120 mil trabajadores y en su mayoría todos se trasladan a lo largo de la carretera 57 para poder llegar a su centro de trabajo (Aranda, 2021). De acuerdo con el conteo del tránsito que realiza la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (STC, 2023) en su red de estaciones permanentes, alrededor de 95 mil vehículos atraviesan la zona de estudio diariamente entre motos, automóviles, autobuses, etc.

Por lo cual resulta ser de vital importancia proponer alternativas de transporte sustentable que ayuden a disminuir las emisiones de los distintos contaminantes que se generan debido a las fuentes móviles.

Para que un proyecto de transporte funcione correctamente y tenga éxito, se requiere una planificación interdisciplinaria y apoyo de las diferentes perspectivas que forman la esencia del proyecto. En este sentido, el cambio en la movilidad urbana es un elemento fundamental de la competitividad urbana. Para lograrlo, estas opciones de transporte deben ser seguras, de calidad, asequibles,

accesibles, sostenibles, innovadoras, convenientes y adecuadas. La movilidad urbana afecta directamente a la calidad de vida de los residentes, la eficiencia laboral, la salud física y mental e incluso la vida familiar. Lo que representa también un factor clave en la competitividad de una ciudad, ya que determina cómo el talento se traslada a las actividades del día a día.

1.4 ANÁLISIS COMPARATIVO: LA CARRETERA 57 COMO EJE DE DESARROLLO EN CIUDADES MEDIAS DEL CENTRO-NORTE

Para dimensionar el papel que desempeña la Carretera Federal 57 en la dinámica territorial de San Luis Potosí, resulta útil observar lo ocurrido en otras ciudades del mismo corredor económico que presentan procesos de industrialización semejantes. La comparación con la Zona Metropolitana de Querétaro y con la región industrial de Saltillo–Ramos Arizpe permite identificar patrones comunes asociados al crecimiento manufacturero, la localización logística y la presión sobre la infraestructura carretera.

1.4.1. CASO I: SANTIAGO DE QUERÉTARO Y LA SATURACIÓN DEL CORREDOR METROPOLITANO

El caso queretano muestra un proceso muy parecido al observado en San Luis Potosí. Con el crecimiento industrial y logístico, la Carretera 57 dejó de operar únicamente como una vía interurbana para convertirse también en un eje de movilidad cotidiana dentro de la ciudad.

Estudios realizados por la Universidad Autónoma de Querétaro señalan que la coexistencia de transporte de carga con viajes urbanos ha generado efectos de fragmentación territorial y mayores tiempos de traslado para la población trabajadora (UAQ, 2021). Esta condición ha provocado que la autopista funcione simultáneamente como corredor nacional y como avenida urbana, lo que incrementa su vulnerabilidad operativa.

Aunque se han construido libramientos con el objetivo de desviar el tránsito pesado, la expansión de parques industriales y centros logísticos hacia los bordes de la autopista ha mantenido la dependencia funcional del corredor. En este sentido, el ejemplo de Querétaro evidencia que los modelos productivos basados en logística sincronizada requieren infraestructura segregada; cuando la vía de exportación queda absorbida por el crecimiento urbano, la eficiencia del sistema se reduce de manera notable. Este escenario guarda una clara similitud con la evolución reciente de la Zona Industrial potosina.

1.5.2. CASO II: SALTILLO Y RAMOS ARIZPE: EL CLÚSTER AUTOMOTRIZ Y LA VULNERABILIDAD LOGÍSTICA

Más al norte del país, el eje Saltillo–Ramos Arizpe constituye otro punto de referencia relevante, particularmente por su fuerte especialización en la industria automotriz. Esta región comparte con San Luis Potosí una integración intensa a las cadenas manufactureras orientadas a la exportación.

De acuerdo con el Instituto Mexicano del Transporte (2020), el corredor que conecta Saltillo con Monterrey cuyo cruce es por la Carretera 57, presenta una de las mayores concentraciones de transporte pesado del país, con predominio de carga de gran capacidad. En estas condiciones, la infraestructura vial ha comenzado a mostrar señales de saturación frente al aumento del volumen productivo asociado al fenómeno reciente de relocalización industrial.

La experiencia de la región sureste de Coahuila indica que la conectividad física por sí sola no garantiza la estabilidad logística. Cuando no existe una gestión eficiente del tránsito o mecanismos de resiliencia operativa, cualquier incidente, condición climática adversa o evento de siniestralidad puede interrumpir el flujo de suministros y generar efectos en cadena sobre las líneas de producción. Esta misma vulnerabilidad se observa en el tramo de la Carretera 57 que atraviesa la Zona Industrial de San Luis Potosí, donde accidentes o cierres parciales provocan congestionamientos severos y retrasos en los desplazamientos laborales y de carga.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y FUENTES MÓVILES

La industrialización de la ciudad de San Luis Potosí ha impulsado un notable crecimiento poblacional, lo que a su vez ha generado importantes problemas ambientales. La falta de una adecuada planeación urbana y la escasa atención de las autoridades gubernamentales para enfrentar estos retos han agravado la situación. Como consecuencia, el aumento en la flota vehicular que circula actualmente en la ciudad ha provocado serios problemas de congestionamiento, los cuales derivan en elevados niveles de emisiones contaminantes a la atmósfera.

La calidad del aire se define como el estado de la atmósfera en función de la concentración de contaminantes presentes y su impacto potencial sobre la salud humana, los ecosistemas y los bienes materiales. En México, la gestión de la calidad del aire se rige por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la cual establece la prevención y control de la contaminación atmosférica como una atribución del Estado.

La contaminación atmosférica por fuentes móviles se refiere a la emisión de contaminantes al aire por parte de vehículos en movimiento, incluyendo automóviles, camiones, autobuses, motocicletas y otros medios de transporte motorizado. Estos vehículos queman combustibles fósiles, como gasolina y diésel, que liberan una variedad de contaminantes perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

Los principales procesos asociados a la emisión de contaminantes por fuentes móviles incluyen la combustión de combustibles fósiles, la resuspensión de partículas del suelo y el desgaste de componentes vehiculares como frenos y neumáticos. Estos procesos ocurren de manera simultánea durante la operación

normal de los vehículos y se intensifican en contextos de alta carga vehicular y circulación intermitente.

En la figura 3, se observa que únicamente una fracción reducida de la energía contenida en el combustible se aprovecha para el desplazamiento del vehículo, mientras que la mayor parte se pierde principalmente en el motor en forma de calor y fricción. Estas pérdidas energéticas están estrechamente vinculadas con la generación de contaminantes emitidos por el escape, entre los que destacan el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los hidrocarburos no quemados y las partículas.

Adicionalmente, el desgaste de neumáticos, frenos y embrague, así como la resuspensión de polvo acumulado en la superficie de rodamiento, constituyen fuentes relevantes de partículas finas, especialmente en zonas con elevados volúmenes de tránsito y condiciones de congestión vial. En estos escenarios, las constantes aceleraciones y frenados incrementan tanto el consumo de combustible como la emisión de contaminantes.

En conjunto, el esquema evidencia la baja eficiencia energética del transporte motorizado individual y pone de manifiesto la necesidad de mejorar la gestión de la movilidad urbana. Comprender estos procesos resulta fundamental para el diseño de estrategias orientadas a la reducción de emisiones, la optimización del tránsito y la mejora de la calidad del aire en corredores con alta demanda vehicular.

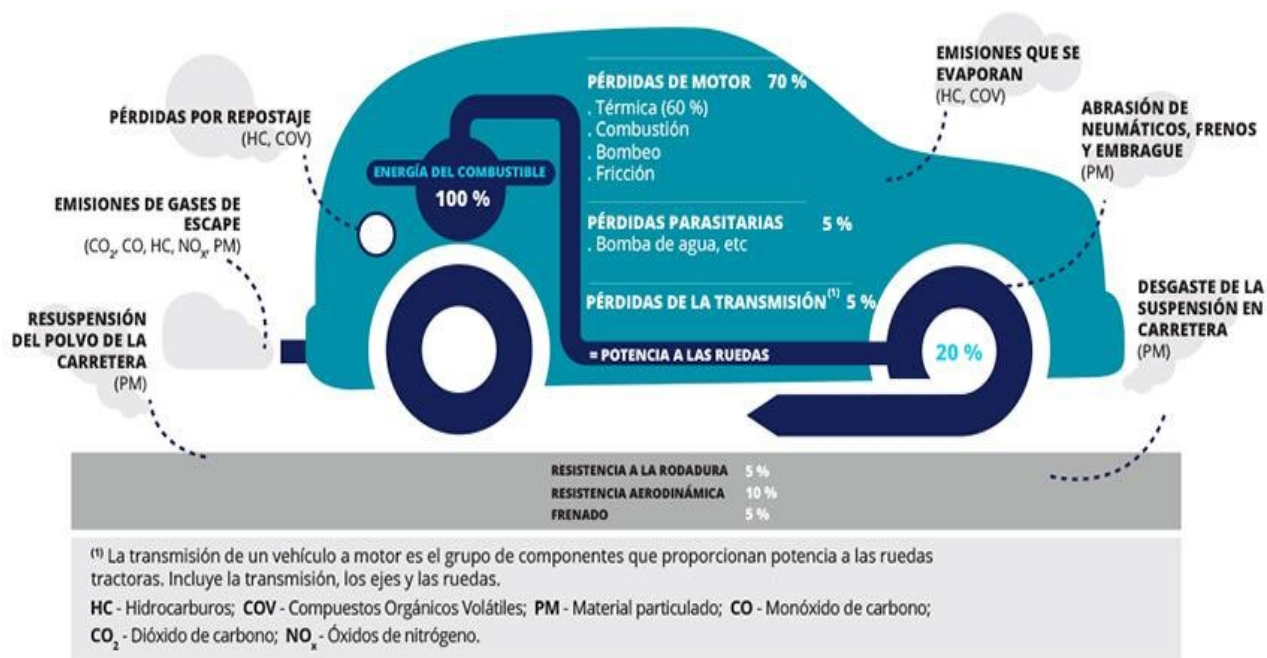


Figura 3. Emisiones atmosféricas por un vehículo motorizado

Fuente: European Environment Agency EEA, 2016.

La combustión es una reacción físico-química de carácter térmico en la que los combustibles fósiles, como la gasolina, el diésel o el gas natural, se oxidan al entrar en contacto con el oxígeno. Este proceso libera la energía necesaria para transformar el calor en movimiento y así generar la fuerza mecánica que permite el funcionamiento de los vehículos (Forum, 2001).

La quema de combustibles fósiles en fuentes móviles contribuye significativamente a las emisiones de los gases y compuestos de efecto invernadero (CYGEI), contaminantes criterio y contaminantes tóxicos. Los CYGEI son compuestos que en grandes cantidades favorecen al calentamiento global, provocando un aumento a la temperatura global, aumento del nivel del mar y fuertes desastres meteorológicos.

Por otra parte, se encuentran los contaminantes criterio, para los cuales se cuentan con normativas internacionales y nacionales. En México existen normas que se encargan de establecer los valores límite permisibles y criterios para la evaluación de los contaminantes criterio. Estas normas tienen la finalidad de proteger la salud de la población, vigilando mediante estaciones de monitoreo que se cumpla con los valores establecidos en ella. Además, muchas de las veces se superan los valores máximos permisibles establecidos sin tomar ninguna acción de mitigación, ya que se cuenta con mucha desinformación al respecto para poder tomar decisiones concretas. Por ello son necesarios los diagnósticos. Sin embargo, en San Luis Potosí existen muy pocos investigadores dedicados a esta rama.

La resuspensión de partículas ocurre cuando los vehículos en movimiento levantan polvo y otras partículas del suelo y la superficie de las carreteras. Este proceso es influenciado por factores como la velocidad del vehículo, la condición de la carretera y el clima.

Dentro de los principales contaminantes emitidos por este proceso se encuentran las PM's o partículas suspendidas que incluyen polvo del suelo, fragmentos de neumáticos y frenos, y otros desechos (Amato et al., 2014). Estas partículas pueden ser inorgánicas o contener compuestos orgánicos y metales pesados. Elementos como el plomo, cadmio y zinc pueden ser levantados del suelo y contribuir a la contaminación atmosférica (Sternbeck et al., 2002). Los metales pesados se encuentran depositados en la superficie del suelo principalmente cerca de zonas industriales.

El desgaste de frenos y neumáticos durante la operación de los vehículos también contribuye a las emisiones de contaminantes. Los materiales de los frenos y neumáticos se degradan por la fricción y el desgaste, liberando partículas a la atmósfera.

En este proceso los contaminantes que se emiten son compuestos orgánicos ya que los neumáticos contienen aditivos y polímeros que pueden volatilizarse o liberarse como partículas cuando se van desgastando (Panko et al., 2013). Metales pesados como el cobre y el zinc, se liberan en forma de partículas durante el frenado ya que forman parte de los componentes de los frenos (Garg et al., 2000). Durante este proceso son liberadas partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} que se emiten por el desgaste de los frenos y neumáticos (Thorpe & Harrison, 2008).

2.2 EMISIONES VEHICULARES Y CONTAMINANTES ASOCIADOS

Las emisiones generadas por las fuentes móviles se caracterizan por su variabilidad espacial y temporal, ya que dependen del tipo de vehículo, el combustible utilizado, las condiciones de operación y el estado del parque vehicular. A continuación, se describen los principales contaminantes asociados a este tipo de fuentes.

2.2.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es uno de los contaminantes más representativos de las fuentes móviles, particularmente de los vehículos que utilizan gasolina. Se genera como resultado de la combustión incompleta del combustible en el motor y suele presentarse en concentraciones elevadas en zonas con congestión vehicular. Desde el punto de vista de la salud, el CO interfiere con la capacidad de la hemoglobina para transportar oxígeno en la sangre, lo que puede provocar efectos adversos que van desde dolores de cabeza hasta complicaciones cardiovasculares en exposiciones prolongadas (EPA, 2020). En los inventarios de emisiones urbanos, las fuentes móviles suelen ser responsables de la mayor proporción de las emisiones totales de este contaminante.

2.2.2 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno, principalmente el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), se forman durante la combustión a altas temperaturas en los motores de los vehículos. El transporte terrestre, en especial los vehículos de carga y aquellos que utilizan diésel, constituye una fuente relevante de NO_x en ambientes urbanos. Estos compuestos desempeñan un papel clave en la formación de contaminantes secundarios, como el ozono troposférico y las partículas finas, además de estar asociadas con efectos negativos en el sistema respiratorio (WHO, 2021). Debido a su importancia, el NO_x es uno de los contaminantes prioritarios en los programas de control de emisiones vehiculares.

2.2.3 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)

Los compuestos orgánicos volátiles comprenden una amplia gama de sustancias químicas emitidas por las fuentes móviles, tanto por los gases de escape como por la evaporación de combustibles durante el almacenamiento y la distribución. Los COV incluyen hidrocarburos no quemados y otros compuestos reactivos que, en presencia de radiación solar y óxidos de nitrógeno, participan en la formación de ozono a nivel del suelo. La literatura señala que el transporte es una de las principales fuentes de COV en zonas metropolitanas, contribuyendo de manera significativa a los episodios de mala calidad del aire (Seinfeld y Pandis, 2016).

2.2.4 PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS (PM₁₀ Y PM_{2.5})

Las partículas emitidas por las fuentes móviles pueden originarse de manera directa, principalmente en motores diésel, o de forma indirecta a partir de reacciones químicas en la atmósfera. Asimismo, el desgaste de frenos, llantas y superficies de rodamiento constituye una fuente adicional de partículas. Las partículas finas (PM_{2.5}) son de particular relevancia debido a su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio, lo que incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Diversos estudios han identificado una relación directa entre la exposición a PM_{2.5} y el aumento de la mortalidad prematura en zonas urbanas con alta intensidad vehicular (HEI, 2019).

2.2.5 DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) Y OTROS GASES DE EFECTO INVERNADERO

El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero emitido por las fuentes móviles y se produce como resultado inevitable de la combustión de combustibles fósiles. Aunque el CO₂ no se considera un contaminante criterio por sus efectos locales en la salud, su relevancia radica en su contribución al calentamiento global. Adicionalmente, las fuentes móviles emiten otros gases de efecto invernadero, como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), en menores cantidades, pero con un alto potencial de calentamiento global (IPCC, 2021). Por esta razón, el sector transporte es un componente clave en las estrategias de mitigación del cambio climático.

2.2.6 OTROS CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS FUENTES MÓVILES

Además de los contaminantes anteriormente descritos, las fuentes móviles emiten contaminantes tóxicos específicos, como benceno, formaldehído y 1,3-butadieno, los cuales están asociados con riesgos carcinogénicos y efectos crónicos en la salud. Estos compuestos, aunque se emiten en menores concentraciones, son relevantes en estudios de exposición poblacional y evaluación de riesgos ambientales, especialmente en áreas cercanas a vialidades de alto flujo vehicular (EPA, 2020).

En conjunto, las fuentes móviles representan una de las principales causas de deterioro de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales. Los contaminantes más relevantes asociados a este tipo de fuentes incluyen el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles, las partículas y el dióxido de carbono. La identificación y cuantificación de estas emisiones constituye un elemento central en la elaboración de inventarios de emisiones y en la formulación de políticas públicas orientadas a la movilidad sostenible y la protección de la salud ambiental.

2.3 MOVILIDAD

Un punto indispensable para poder entender la importancia de este proyecto de investigación es comprender el concepto de movilidad. La Unión Internacional de Transporte Público define el desplazamiento como la capacidad de trasladarse o ser trasladado libremente y con facilidad (UITP, 2020).

El transporte y la capacidad de traslado constituyen una característica fundamental de la sociedad moderna, reflejando la posibilidad de las personas y bienes para moverse de un lugar a otro. Este concepto abarca una amplia gama de modos, desde caminar y andar en bicicleta hasta utilizar vehículos motorizados y transporte público. La accesibilidad territorial es esencial para el desarrollo económico y social, ya que facilita el acceso a oportunidades de empleo, educación, servicios de salud y otros recursos vitales.

La circulación de personas y mercancías no solo se refiere al movimiento físico, sino también a la infraestructura y las políticas que permiten y optimizan estos traslados. Esto incluye carreteras, ferrocarriles, sistemas de transporte público y el diseño urbano que influye en cómo se desplazan las personas y los bienes dentro de un espacio geográfico.

En el contexto urbano, la dinámica de desplazamiento urbano se centra en cómo se organizan y gestionan los traslados dentro de las ciudades. Una gestión eficiente del transporte urbano busca integrar diferentes modos de transporte, optimizar la infraestructura y fomentar el uso de alternativas sostenibles para reducir la dependencia de los vehículos privados y mejorar la accesibilidad para todos los ciudadanos.

Dentro de este enfoque podemos encontrar el concepto de transporte sostenible. La Comisión Europea lo define como un sistema de transporte que satisface las necesidades económicas, sociales y ambientales de las sociedades de una manera que minimiza las externalidades negativas, tales como la contaminación

del aire, el ruido y las emisiones de gases de efecto invernadero, y que promueve la eficiencia energética y el uso racional de los recursos naturales.

El sistema de transporte y accesibilidad es un factor crítico para el desarrollo económico y social, ya que permite el acceso a empleos, educación, servicios de salud y otros recursos esenciales. Una planificación eficiente del transporte puede mejorar la calidad de vida, reducir la congestión y minimizar los impactos ambientales negativos asociados con el traslado de personas y mercancías.

2.4 RELACIÓN ENTRE CONDICIONES DE OPERACIÓN VIAL Y GENERACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES

La cantidad de contaminantes generados por el transporte vehicular no depende únicamente del volumen de unidades que circulan en una vialidad, sino también de la forma en que opera el flujo de tránsito. Variables como la velocidad promedio, la densidad vehicular, la continuidad de la circulación y los periodos de operación a baja velocidad influyen directamente en el consumo de combustible y en los niveles de emisión asociados al desplazamiento (SEMARNAT, 2014).

Para comprender estas condiciones de operación resulta necesario considerar la capacidad vial y el nivel de servicio del tramo analizado. La capacidad vial se entiende como el número máximo de vehículos que una infraestructura puede soportar en un periodo determinado manteniendo condiciones razonables de circulación. Cuando la demanda vehicular se aproxima a este límite, comienzan a presentarse reducciones en la velocidad, aumento en los tiempos de recorrido y mayor sensibilidad del flujo ante cualquier perturbación.

El nivel de servicio permite describir estas condiciones de operación desde una perspectiva funcional. Este indicador se utiliza para caracterizar la calidad del flujo vehicular considerando elementos como la velocidad de circulación, la libertad de maniobra, la estabilidad del tránsito y el grado de interferencia entre

vehículos. De forma convencional, los niveles de servicio se clasifican en una escala de A a F, donde los niveles superiores representan circulación fluida y estable, mientras que los niveles inferiores corresponden a escenarios de saturación, circulación inestable y formación de congestión (Transportation Research Board, 2016).

Cuando una vialidad opera en niveles cercanos a la saturación, el tránsito se vuelve más irregular y aumenta la frecuencia de arranques, frenados y periodos de ralentí. Estas condiciones reducen la eficiencia energética del motor y favorecen un incremento en las emisiones por kilómetro recorrido. En contraste, los flujos más estables permiten que los motores funcionen en rangos de operación más constantes, lo que mejora la eficiencia de la combustión y reduce la generación de contaminantes. Este comportamiento ha sido documentado en estudios sobre inventarios de emisiones del sector transporte en México, donde se identifica una relación directa entre condiciones de circulación congestionada y mayores factores de emisión (INECC, 2018).

La problemática se intensifica en corredores que concentran simultáneamente tránsito local, desplazamientos laborales y transporte de carga pesada. En estos contextos, la mezcla de tipologías vehiculares y la presión constante sobre la infraestructura generan condiciones de circulación intermitente durante amplios periodos del día. Además, los horarios de mayor demanda suelen coincidir con las jornadas laborales y con los ciclos logísticos de distribución, incrementando la probabilidad de saturación y el impacto ambiental asociado al tránsito vehicular (SICT, 2022).

En este sentido, el análisis del nivel de servicio y de los patrones de movilidad no solo permite evaluar el desempeño operativo de la infraestructura, sino también interpretar el comportamiento de las emisiones vehiculares en función de las condiciones reales de circulación. Comprender esta relación aporta elementos técnicos relevantes para identificar tramos con mayor presión operativa y orientar

el diseño de estrategias destinadas a mejorar la movilidad, optimizar el funcionamiento vial y reducir la carga contaminante asociada al transporte.

2.5 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

La contaminación ambiental representa un reto importante para los pobladores de todo el mundo. Es por ello por lo que, dentro de los 17 objetivos del desarrollo sostenible que aprobó la Organización de las Naciones Unidas en la agenda 2030 se establecieron metas que permitirán bajar las emisiones de contaminantes emitidos a la atmósfera y por consiguiente favorecer a la mejora de la calidad del aire.

Dentro del objetivo número 3, se encuentra el garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades (ONU, 2023). Para medir el cumplimiento de este objetivo uno de sus indicadores es disminuir la cantidad de muertes y enfermedades causadas por la contaminación del aire, reduciendo la tasa de mortalidad atribuida a la contaminación de los hogares y del aire ambiente.

Otro de los objetivos relacionadas es el 7, en este se habla acerca del uso de energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la mejora en la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas, y en disminuir el empleo de combustibles fósiles para bajar la cantidad de contaminantes producidos por su uso, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.

En el objetivo 9, se establecen metas enfocadas en la implementación de tecnologías más limpias, fomentando la sostenibilidad en las industrias y mejorando la infraestructura.

Uno de los objetivos con los cuales se relaciona de forma directa el presente estudio es el 11, en específico el 11.2 cuyo fin es el de proporcionar acceso a

sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público.

Y por último se encuentra el objetivo 13, en donde se habla sobre implementar medidas que ayuden a mitigar los efectos del cambio climático y disminuir la contaminación atmosférica (ONU, 2015).

Alcanzar estos objetivos requiere el compromiso de todos los sectores de la sociedad, desde los gobiernos hasta los ciudadanos individuales, realizando acciones que apoyen a mejorar la calidad del aire en todas las ciudades.

2.6 INVENTARIOS DE EMISIONES

2.6.1 INVENTARIO DE EMISIONES TEÓRICO

La gestión y control de las emisiones de contaminantes atmosféricos es esencial para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública. En este contexto, los inventarios de emisiones desempeñan un papel crucial al proporcionar estimaciones sistemáticas de la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera por diversas fuentes. Un enfoque común para realizar estos inventarios es el método teórico, que se basa en modelos matemáticos, factores de emisión estándar y datos de actividad.

Un inventario de emisiones teórico es una estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos basada en la aplicación de modelos matemáticos y factores de emisión a datos de actividad específicos. Dichos inventarios incluyen datos sobre las cantidades de contaminantes emitidos a la atmósfera desde diversas fuentes dentro de un área geográfica específica y durante un período de tiempo determinado (U.S. EPA, 2016).

A diferencia de las mediciones directas, que requieren equipos de monitoreo sofisticados y costos elevados, el inventario teórico se fundamenta en cálculos y suposiciones que permiten obtener resultados de manera más accesible y económica (Jones, 2019). Estos inventarios son fundamentales para la elaboración de políticas ambientales, permitiendo a las autoridades identificar las principales fuentes de contaminación y evaluar las tendencias en las emisiones.

Los componentes clave de un inventario de emisiones teórico incluyen:

1. Modelos Matemáticos: Estos modelos utilizan ecuaciones y algoritmos para estimar las emisiones en función de múltiples variables, como el tipo de fuente, la cantidad de actividad y las condiciones operativas. Los modelos matemáticos permiten incorporar diversos factores que influyen en las emisiones, proporcionando una base para las estimaciones (Jones, 2019).
2. Factores de Emisión Estándar: Los factores de emisión son coeficientes que representan la cantidad de contaminante emitido por unidad de actividad, como kilómetros recorridos por un vehículo o toneladas de combustible consumido. Estos factores se derivan de estudios empíricos y son proporcionados por agencias reguladoras y organismos de investigación. Por ejemplo, la EPA proporciona factores de emisión para diferentes tipos de vehículos y combustibles, lo que facilita su uso en inventarios teóricos (Smith et al., 2018).
3. Datos de Actividad: Incluyen información sobre la frecuencia y magnitud de las actividades que generan emisiones. Esto puede abarcar desde el número de vehículos en circulación hasta la cantidad de producción industrial. Los datos de actividad son cruciales para aplicar los factores de emisión correctamente y obtener estimaciones precisas (Rodríguez y Pérez, 2020).

Los inventarios de emisiones se utilizan para:

- Desarrollo de Políticas: Informan la creación de regulaciones ambientales y programas de control de la contaminación.
- Monitoreo de Cumplimiento: Ayudan a verificar el cumplimiento de las normativas ambientales.
- Modelado y Predicción: Alimentan modelos de dispersión atmosférica para predecir la calidad del aire futura.

Podemos decir entonces que un inventario de emisiones teórico es una herramienta esencial en la gestión ambiental, permitiendo estimar la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera en ausencia de mediciones directas. A través de modelos matemáticos, factores de emisión estándar y datos de actividad, este enfoque ofrece una solución accesible y flexible para la evaluación de emisiones. Sin embargo, su precisión puede verse limitada por la dependencia en promedios y suposiciones generales, subrayando la importancia de ajustar las estimaciones a las condiciones locales. A medida que avanzamos hacia una mayor comprensión y control de la contaminación atmosférica, los inventarios teóricos seguirán desempeñando un papel crucial en la protección del medio ambiente y la salud pública.

2.6.2 OTROS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES, SOFTWARE MOVES

El Simulador de Emisiones de Vehículos de Motor (MOVES) es una herramienta desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés - Motor Vehicle Emissions Simulator) que se utiliza para estimar las emisiones de contaminantes provenientes de vehículos motorizados (U.S.EPA, 2018). Esta herramienta es fundamental para la planificación y gestión de la calidad del aire, así como para la formulación de políticas ambientales relacionadas con el transporte.

Dentro de las principales funcionalidades se encuentran la estimación de emisiones.

Estimación de emisiones:

MOVES permite calcular inventarios de emisiones, es decir, la cantidad total de emisiones generadas en un periodo de tiempo específico. Esto incluye una amplia gama de contaminantes como óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), partículas en suspensión (PM), compuestos orgánicos volátiles (COV), entre otros.

Los usuarios pueden definir las condiciones bajo las cuales se realizarán las estimaciones, incluyendo factores como el tipo de vehículo, el combustible utilizado, las condiciones de manejo y los patrones de tráfico.

1. Factores de Emisión:

- MOVES también puede determinar factores de emisión, que son las emisiones producidas por unidad de distancia recorrida o por unidad de población. Esto es útil para entender el impacto ambiental de diferentes tipos de vehículos y para planificar estrategias de reducción de emisiones.

2. Escalabilidad y Flexibilidad:

- La herramienta está diseñada para ser utilizada a diferentes escalas, desde estudios locales hasta evaluaciones nacionales. Su flexibilidad permite a los usuarios ajustar los parámetros y condiciones según las necesidades específicas de cada análisis.

MOVES es ampliamente utilizado en diferentes sectores, se ha convertido en una herramienta esencial para abordar la problemática de las emisiones vehiculares. Permite a agencias gubernamentales, investigadores y planificadores ambientales evaluar y gestionar las emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles.

MOVES es fundamental para desarrollar e implementar planes de mejora de la calidad del aire. La herramienta permite a los planificadores identificar las principales fuentes de contaminación vehicular y evaluar el impacto de diversas políticas y medidas de control. Por ejemplo, los usuarios pueden simular diferentes escenarios de políticas y estrategias de mitigación, lo que permite una planificación proactiva y adaptativa. Esta capacidad es esencial para abordar problemas específicos de contaminación en distintas regiones y para asegurar el cumplimiento de los estándares nacionales e internacionales de calidad del aire.

MOVES proporciona una base sólida para realizar estudios científicos detallados sobre la contaminación del aire. Los investigadores pueden usar la herramienta para entender mejor los patrones de emisión y su relación con diferentes factores, como el tipo de vehículo, el combustible y las condiciones de manejo. Esta capacidad de análisis detallado es crucial para identificar las fuentes principales de emisiones y desarrollar estrategias efectivas para su reducción.

Además, MOVES facilita el análisis de los efectos de la contaminación del aire en la salud pública. Permite a los investigadores identificar correlaciones entre las emisiones vehiculares y enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Esto es fundamental para desarrollar estrategias de salud pública y programas de concienciación que puedan mitigar los impactos negativos de la contaminación del aire en las comunidades más afectadas.

Por otro lado, MOVES promueve la creación de regulaciones y políticas ambientales efectivas al proporcionar datos precisos y actualizados sobre las emisiones de vehículos. Esto incluye la formulación de estándares de emisiones para vehículos nuevos y la implementación de programas de inspección y mantenimiento. La herramienta permite a los responsables de políticas evaluar el impacto potencial de diferentes regulaciones antes de su implementación, asegurando así que las decisiones tomadas se basen en evidencia sólida y científica.

Además, MOVES apoya el desarrollo de políticas que promueven el uso de tecnologías limpias y sostenibles, como vehículos eléctricos e híbridos, así como combustibles alternativos. Evaluar el impacto potencial de estas tecnologías en la reducción de emisiones es crucial para promover una transición hacia un transporte más sostenible y menos dependiente de los combustibles fósiles. Asimismo, la herramienta contribuye a la planificación urbana al proporcionar datos sobre cómo las diferentes configuraciones de infraestructura de transporte pueden afectar las emisiones, ayudando a diseñar ciudades más sostenibles y a reducir la dependencia del transporte privado.

MOVES también tiene un papel importante en la educación y capacitación de futuros profesionales en el campo de la calidad del aire y la gestión ambiental. La herramienta se utiliza en programas educativos y de capacitación para formar a estudiantes y profesionales en la modelación de emisiones y el análisis de datos. Esta formación práctica es esencial para preparar a los individuos para enfrentar los desafíos ambientales actuales y futuros.

Además, las agencias gubernamentales y organizaciones de investigación utilizan MOVES para capacitar a su personal técnico. Esto asegura que los técnicos estén preparados para utilizar la herramienta de manera efectiva, maximizando su potencial en la gestión de la calidad del aire y la formulación de políticas.

En pocas palabras, MOVES es una herramienta integral que facilita la planificación, investigación y formulación de políticas relacionadas con la calidad del aire. Su capacidad para proporcionar datos detallados y precisos sobre las emisiones vehiculares hace que sea indispensable para abordar los problemas de contaminación del aire y promover un entorno más saludable y sostenible. Al apoyar la planificación de la calidad del aire, la investigación científica, la formulación de políticas y la educación, MOVES juega un papel crucial en la protección del medio ambiente y la salud pública.

3. METODOLOGÍA

La figura 2, ilustra detalladamente la metodología que se implementará para abordar cada uno de los objetivos establecidos en el estudio. Esta metodología ha sido diseñada meticulosamente para asegurar que se cubran todos los aspectos relevantes y se alcancen los resultados esperados de manera eficaz y eficiente.



Figura 4. Metodología.

Fuente: Elaboración propia.

La Definición del Área de Estudio implica identificar la zona de influencia donde el proyecto tendrá un impacto directo. La Recopilación de Información abarca la investigación documental, el acercamiento con dependencias de gobierno como la Secretaría de Finanzas y Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental, además de la descarga de información que tiene publica la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Una vez obtenida la información, se procesa para realizar el inventario de emisiones teórico para la obtención de datos. Posteriormente se realiza una comparación entre los dos años y se hace un análisis de los resultados. Con base en este análisis, se emite un Diagnóstico de la situación para identificar los problemas de movilidad, y se proponen diversas soluciones que son evaluadas desde diferentes perspectivas. Además, se incluye dentro de la metodología una encuesta origen-destino que tiene como objetivo conocer la percepción en diferentes ámbitos de los trabajadores de la zona industrial respecto a la movilidad en el área de estudio. Otro punto importante es la realización de entrevistas a los distintos actores involucrados en la toma de decisiones, planeación y otros factores que afectan la movilidad en la zona. En conjunto, esta secuencia de pasos permitirá alcanzar los objetivos planteados.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CARRETERA 57

La carretera 57, actualmente y desde su construcción ha sido una de las vías más importantes del país. Ya que conecta a grandes ciudades a través de todo el país. Este corredor vial es estratégico para el comercio y la industria, ya que forma parte de las principales rutas de transporte de mercancías hacia Estados Unidos. En su tramo por la zona industrial de San Luis Potosí, esta vialidad soporta un alto volumen de tráfico vehicular, compuesto en gran medida por transporte pesado debido a la presencia de múltiples parques industriales y centros de distribución.

La capacidad de carga de una carretera se refiere a la cantidad máxima de vehículos que puede manejar de manera eficiente y segura en condiciones específicas. Para determinar la capacidad de carga del área de estudio, se consideran varios factores:

Clasificación de la carretera: Esta carretera es una vía de gran importancia que conecta diversas regiones del país, por lo que generalmente se clasifica como una carretera federal de alta capacidad (SCT, 2023).

1. Número de carriles: En los tramos con mayor densidad vehicular, como el de la zona industrial de San Luis Potosí, este eje carretero federal cuenta con al menos dos carriles por sentido, lo que incrementa su capacidad (INEGI, 2020).
2. Condiciones de diseño: Factores como el ancho de los carriles, los acotamientos laterales, las pendientes y las curvas influyen en la capacidad de carga. Según la SCT (2023), estos elementos son fundamentales para evaluar la eficiencia de una carretera.
3. Nivel de servicio (LOS): Según el Manual de Carreteras de la SCT, el nivel de servicio evalúa la calidad del flujo vehicular en una escala de A (excelente) a F (congestión extrema). Un nivel de servicio aceptable suele estar entre B y D para carreteras de alto tráfico (SCT, 2023). En este caso el tramo que estamos evaluando se clasifica con un nivel de servicio F, es decir se refiere a flujos forzados, donde los volúmenes están por debajo de la capacidad, lo que provoca la reducción de velocidades y puede llevar a paradas continuas debido a los embotellamientos.

4. Transito diario promedio anual (TDPA): En estudios realizados, el volumen vehicular de este tramo puede superar los 100,000 vehículos diarios, con una alta proporción de vehículos de carga pesada debido a la actividad industrial en la región (SCT, 2023).
5. Capacidad teórica: En términos generales, para una carretera con dos carriles por sentido en condiciones ideales, la capacidad puede ser de 2,000 a 2,400 vehículos por hora por carril, dependiendo de factores como la mezcla vehicular y las intersecciones (TRB, 2016).

En la figura 3. Se observan los datos obtenidos en el reporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del año 2023, capacidad y niveles de servicio en la red federal de carreteras para el tramo de la zona de estudio en donde podemos observar que su nivel de servicio se clasifica como F, acompañado de un volumen horario máximo aproximado de 18,010 vehículos, lo que indica condiciones de operación cercanas o superiores a la capacidad de la infraestructura vial.

CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO													
ESTADO: SAN LUIS POTOSI													
AÑO: 2023													
Car.: Querétaro - San Luis Potosí							Red: Federal Libre						
TRAMO	Km	V.H.	Porcentaje		Tt	# C	VOLÚMENES DE SERVICIO					N	S
			B	Cam			A	B	C	D	E		
Lim. Edos. Term. Gto. Ppia. S. L. P. - T. Der. Tierra Nueva	140.65	1,754	6%	44%	L	4	1,002	1,474	1,946	2,447	2,948	C	
T. Der. Tierra Nueva - T. Izq. Santa María del Río	155.88	1,738	5%	38%	L	4	1,102	1,621	2,140	2,691	3,242	C	
T. Izq. Santa María del Río - T. Izq. Villa de Reyes	176.35	2,144	6%	39%	L	4	1,065	1,567	2,068	2,601	3,134	D	
T. Izq. Villa de Reyes - T. Izq. Villa de Arriaga (Cuota)	182.60	4,171	4%	34%	P	4	2,008	2,953	3,898	4,902	5,906	D	
T. Izq. Villa de Arriaga (Cuota) - X. C. Libramiento de San Luis Potosí	184.80	6,703	4%	33%	P	4	2,026	2,979	3,933	4,946	5,959	F	
X. C. Libramiento de San Luis Potosí - X. Periférico de San Luis Potosí	197.50	18,010	1%	7%	P	4	2,408	3,541	4,674	5,878	7,082	F	
X. Periférico de San Luis Potosí - San Luis Potosí	201.66	18,010	1%	7%	P	10	5,523	8,123	10,722	13,483	16,245	F	

Figura 5. Capacidad y niveles de servicio de la zona de estudio.

Fuente: Secretaría de comunicaciones y transportes, 2023.

De manera particular, el tramo comprendido entre el cruce con el Libramiento de San Luis Potosí y el Periférico, así como el segmento Periférico–San Luis Potosí, ambos con nivel de servicio F, coinciden espacialmente con las áreas de mayor concentración de actividades industriales y logísticas de la ciudad. Esta correspondencia evidencia la relación directa entre la estructura territorial, la localización de los parques industriales y la elevada presión que se ejerce sobre la carretera 57 como principal eje de acceso y salida de la Zona Industrial.

Las condiciones asociadas a un nivel de servicio F se caracterizan por una circulación inestable, velocidades reducidas, frecuentes detenciones y una alta probabilidad de congestión prolongada, particularmente durante los horarios de mayor demanda. Desde el punto de vista ambiental, este tipo de operación vial favorece un incremento en el consumo de combustible y en la emisión de contaminantes atmosféricos por fuentes móviles, como resultado de los constantes ciclos de aceleración y frenado, lo que refuerza la relevancia de este tramo como un punto crítico para el análisis conjunto de movilidad y emisiones.

3.2 DELIMITACIÓN DE ZONA DE ESTUDIO

El primer paso fue seleccionar el área de estudio, el cual se desarrollará en la ciudad de San Luis Potosí. Específicamente al sur de la ciudad en la zona industrial, el área de estudio inicia en la bajada del puente que sale del parque Logistik II a la carretera 57 (22.003484, -100.834869) y finaliza en la carretera 57 esquina con Av. Colorines (22.145826, -100.949070) (véase fig. 4). Para la selección del área de estudio se tomaron en consideración aspectos importantes como la ubicación del sector industrial, la zona de convergencia de automóviles hacia sus centros de trabajo y hogares, la cantidad de vehículos que transitan por la zona de estudio y la zona donde generalmente existe congestionamiento vehicular en horas pico. La zona de estudio es de aproximadamente 20 km de longitud.

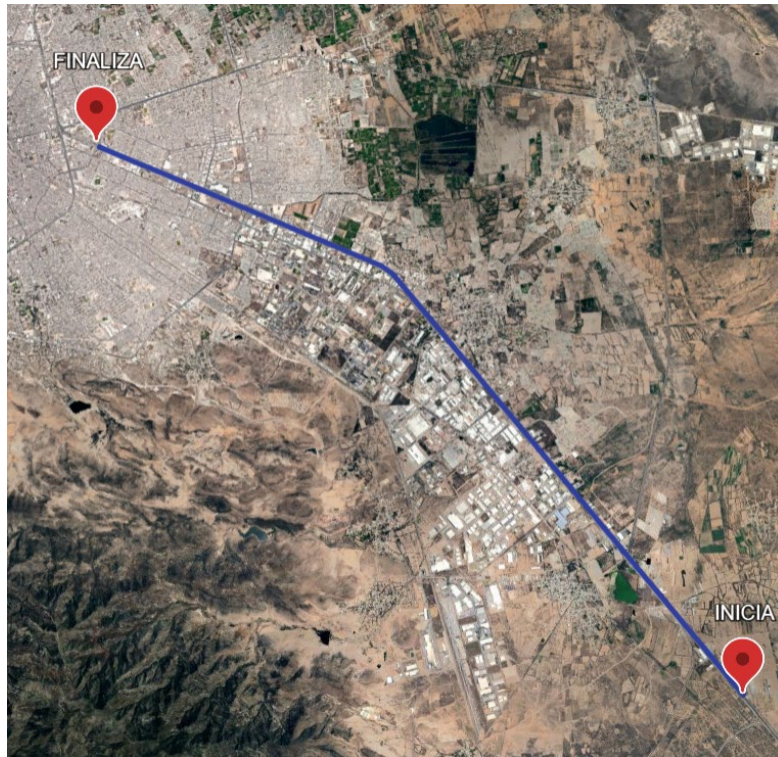


Figura 6. Zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para conocer la magnitud y variación estacional de los volúmenes de tránsito, durante el año 2023 en la zona de estudio se usarán las bases de datos de la secretaria de comunicaciones y transportes, en donde por medio de una red de estaciones permanentes se cuantifica de manera anual el número de vehículos que circulan en los diferentes tramos de la red de carreteras (véase fig. 8). Los datos serán tomados de la red de carreteras libres, la estación es la numero 17 CARR Querétaro – San Luis Potosí. En específico 6 de los puntos generadores:

Libramiento de San Luis Potosí (Latitud: 22° 01' 49.11" N Longitud: 100° 50' 57.71" O, Latitud: 22° 01' 48.62" N Longitud: 100° 50' 56.75" O)

Periférico de San Luis Potosí (Central) (Latitud: 22° 07' 19.07" N Longitud: 100° 54' 45.86" O, Latitud: 22° 07' 18.31" N Longitud: 100° 54' 45.63" O)

Periférico de San Luis Potosí (Lateral) (Latitud: 22° 07' 16.80" N Longitud: 100° 54' 46.88" O, Latitud: 22° 07' 18.26" N Longitud: 100° 54' 46.73" O).

En los tres puntos se consideran ambos sentidos (ver fig. 7). El valor que se tomará para el estudio será el TDPA que corresponde al tránsito diario promedio anual del año 2023 que se registra en el punto generador.

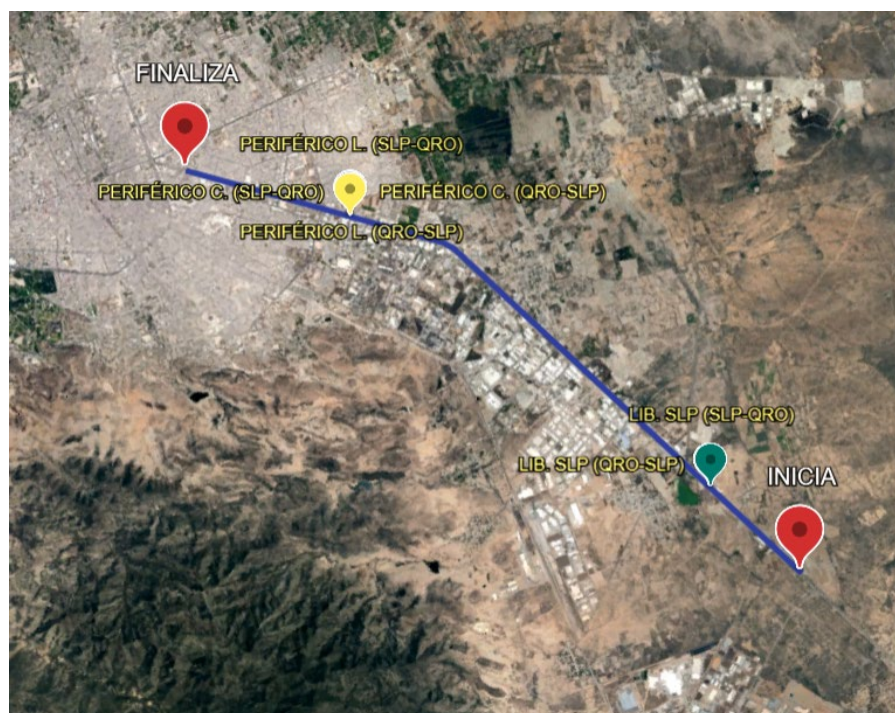


Figura 7. Zona de estudio y ubicación de puntos de aforo vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

En dichas bases de datos se muestra en porcentajes, la clasificación de los tipos de vehículo que integran el TDPA. Dentro el cual se contemplan motos, automóviles, autobuses, camiones unitarios de diferentes ejes, entre otros.

Para el estudio es necesario homogeneizar el transporte por tipo de vehículo con la ayuda de la NOM-012-SCT-2-2017, sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, donde se especifican las características con las que debe contar cada tipo de vehículo carretero (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017) y como guía se consultara la base de datos del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) para

comparar los registros que ellos tienen con la clasificación realizada con base a la NOM-012-SCT-2-2017. En este estudio no fue necesario ya que la secretaria de comunicaciones y transportes ya tenía el dato específico.

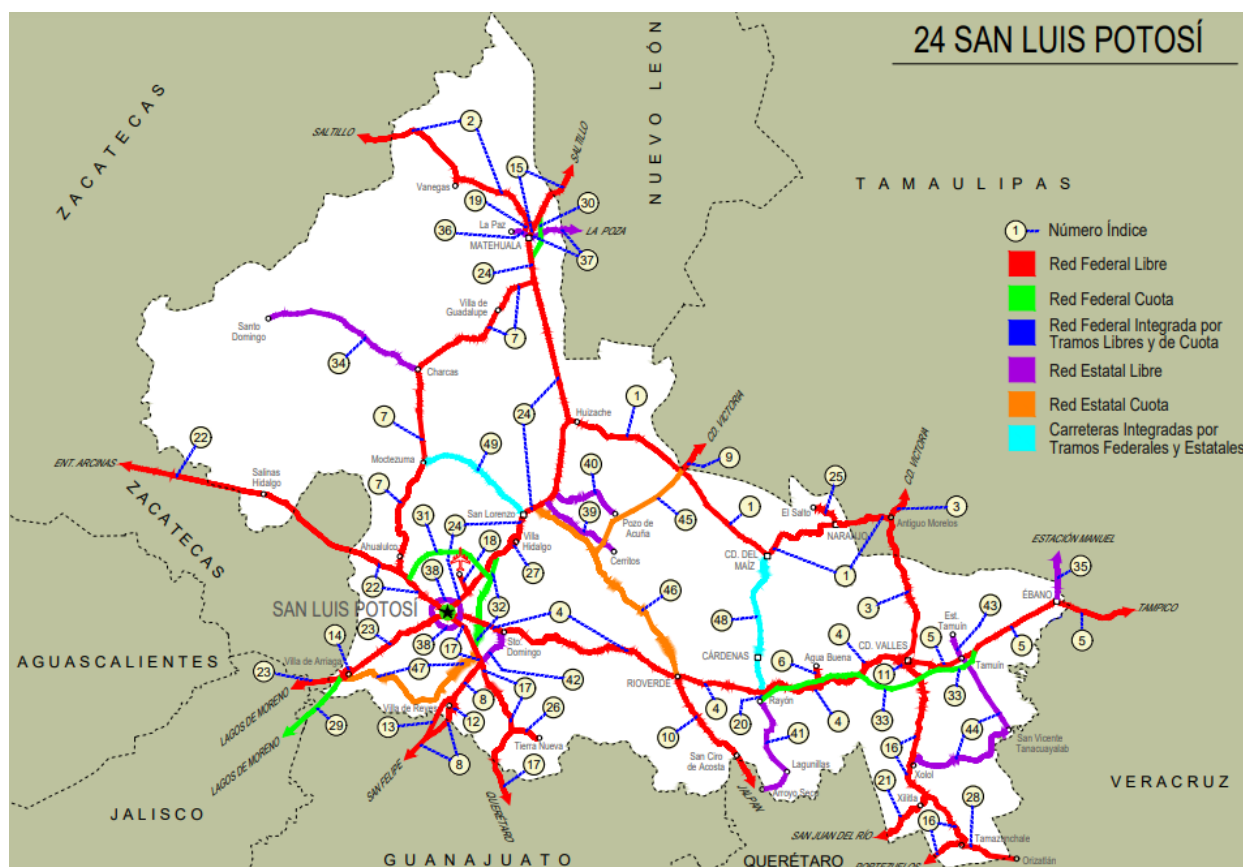


Figura 8. Red de carreteras del estado de San Luis Potosí.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y transportes (2023).

En la figura 8, se muestran las carreteras que recorren el Estado de San Luis Potosí. En la imagen se pueden apreciar las carreteras federales libres y de cuota, las estatales libres y de cuota y las integradas por tramos federales y estatales libres y de cuota.

3.4 INVENTARIO DE EMISIONES TEÓRICO A PARTIR DE FACTORES DE EMISIÓN

Es necesario apoyarnos en los factores de emisión para la estimación de emisiones por fuentes móviles en el área de estudio. Los factores de emisión son valores representativos que están relacionados con la cantidad de gases que se emiten a la atmosfera por la realización de actividades y que ayudan a estimar las tasas de emisión (Hernández et al., 2022). Generalmente los factores de emisión se expresan en kilogramos de contaminante (CO_2 , SO_2 , NO_x , etc.) emitido a la atmosfera por kg de combustible consumido.

Para la elaboración del inventario de emisiones, se ejecutaron los siguientes procedimientos:

- 1) Clasificación del Parque Vehicular: Se identificaron y categorizaron las fuentes móviles presentes en la zona de estudio (por ejemplo: vehículos ligeros, pesados, motocicletas).
- 2) Recolección de Datos de Actividad: Se obtuvieron los registros de operatividad, específicamente los kilómetros recorridos por categoría vehicular y el tipo de combustible consumido.
- 3) Selección de Factores de Emisión: Se emplearon coeficientes específicos para cada tecnología vehicular y tipo de contaminante, los cuales relacionan la cantidad de sustancia emitida con la actividad de la fuente, siguiendo las directrices del IPCC (2006).
- 4) Cálculo de Emisiones: Se estimó la producción anual de contaminantes criterio mediante la integración de los datos de actividad y los factores seleccionados. Esto permitió identificar los tipos de vehículos con mayor contribución a la degradación atmosférica en el área evaluada.

- 5) Evaluación y Verificación: Se validaron los resultados obtenidos para asegurar su precisión y confiabilidad técnica, conforme a los estándares internacionales de la EEA (2019).

Para el paso número uno la fuente que se seleccionó para el estudio son las fuentes móviles, como se mencionó en el marco conceptual las fuentes móviles hacen referencia a la emisión de contaminantes atmosféricos por parte de vehículos automotores.

Para llevar a cabo la estimación de las emisiones por fuentes móviles carreteras la ecuación que generalmente es usada tiene la siguiente estructura:

$$E_{ij} = FE_{ij} * DA_j * VC_j$$

Dónde:

E_{ij} : Emisiones totales de i contaminante y j categoría vehicular.

FE_{ij} : El factor de emisión de i contaminante y j categoría vehicular (en gr/km).

DA_j : Dato de actividad de j categoría vehicular para un vehículo (en km /día o año).

VC_j : El número de vehículos de j categoría.

Posterior al cálculo de la cantidad de emisiones que se generan en el área de estudio, se realizará una comparación con los valores obtenidos en MOVES. Después se procederá con la interpretación de la información obtenida a partir de la cual se darán recomendaciones que ayuden a disminuir la emisión de contaminantes por fuentes móviles.

3.5 IMPORTANCIA DE LA COMPARACIÓN TEMPORAL 2016–2023

La comparación entre los inventarios de emisiones correspondientes a los años 2016 y 2023 resulta necesaria para evaluar la evolución del impacto de las fuentes móviles en un contexto donde la información oficial disponible presenta una brecha temporal relevante. El inventario de 2016 constituye el último ejercicio integral de emisiones realizado a nivel estatal, por lo que representa el principal referente histórico para el análisis de la calidad del aire y la movilidad en San Luis Potosí. En contraste, los datos de tránsito, parque vehicular y actividad disponibles hasta 2023 permiten incorporar una perspectiva actualizada sobre la dinámica de movilidad, particularmente en corredores estratégicos como la carretera 57.

Realizar esta comparación permite identificar cambios en la intensidad del tránsito y en la distribución de los flujos vehiculares, así como evaluar si las variaciones observadas en las emisiones estimadas responden a mejoras estructurales en el sistema de transporte o, por el contrario, a una mayor concentración de impactos en zonas específicas. Asimismo, este análisis temporal facilita contextualizar los resultados del inventario teórico más reciente dentro de la evolución real del parque vehicular y del tránsito, lo que resulta fundamental para sustentar diagnósticos y propuestas de movilidad urbana sostenible en ausencia de inventarios estatales más recientes.

3.6 ENCUESTAS ORIGEN DESTINO

La Encuesta Origen-Destino se define como un instrumento estadístico diseñado para recopilar información sobre los desplazamientos que realizan las personas en un área geográfica determinada, identificando el punto de inicio (origen), el punto de llegada (destino), el motivo del viaje, el modo de transporte utilizado y los tiempos de traslado. Según Ortúzar y Willumsen (2011), la EOD es la fuente primaria de información para entender la estructura de la demanda de transporte

y es esencial para modelar los flujos vehiculares en corredores industriales. En el contexto de esta investigación, la EOD permite caracterizar los hábitos de movilidad de la fuerza laboral y estimar el tiempo de exposición a contaminantes criterio durante los periodos de máxima demanda vial.

Se realizó una encuesta origen destino de manera aleatoria y en formato electrónico a un estimado de 384 personas, más adelante se menciona como se realizó el cálculo para seleccionar el tamaño de la muestra. Para la encuesta se contempla que trabajadores de la zona industrial que habitan en distintas zonas de la ciudad de San Luis Potosí, nos apoyen con el llenado para recabar información de las características de los viajes que realizan con mayor frecuencia y acercarnos a la problemática que se presenta en la zona y que requerimientos de vialidades, y transporte consideran que sería necesario implementar en la ciudad y principalmente en la zona de estudio.

Para conocer el tamaño de muestra se aplicó la fórmula de Cochran:

$$n_0 = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{E^2}$$

n_0 = Tamaño de muestra necesario.

Z = Valor Z asociado con el nivel de confianza deseado (para un 95% de nivel de confianza, $Z \approx 1.96$).

p = Proporción estimada de la población

E = Margen de error tolerable (expresado como decimal para un 5% de margen de error, $E = 0.05$).

Para la ecuación se seleccionó un nivel de confianza del 95%, un margen de error del 5%, una desviación estándar de 0.5% y un tamaño de población de 125,000 de acuerdo con los datos de la SEDECO.

Sustituyendo los datos:

$$n_0 = \frac{3.8416 \cdot 0.5 \cdot (1-0.5)}{0.05^2}$$

$$n_0 = \frac{3.8416 \cdot 0.25}{0.0025}$$

$$n_0 = \frac{0.9604}{0.0025}$$

$$n_0 = 384.16$$

Teniendo un tamaño de muestra de = 384.

Se ha planteado una encuesta la cual se elaboró de manera electrónica por medio de la plataforma de Google forms y se aplicó de manera aleatoria a un total de mínimo 384 trabajadores de la zona industrial como se mencionó anteriormente. El cuestionario consta de 20 preguntas divididas en 4 secciones, 19 de opción múltiple y 1 abierta a comentarios adicionales. Dentro de las preguntas se contemplan las siguientes:

Sección 1: Información del Encuestado

1. Rango de Edad:

- a. 18-30
- b. 31-45
- c. 46-59
- d. Más de 60

2. Género:

- a. Masculino
- b. Femenino
- c. Otro

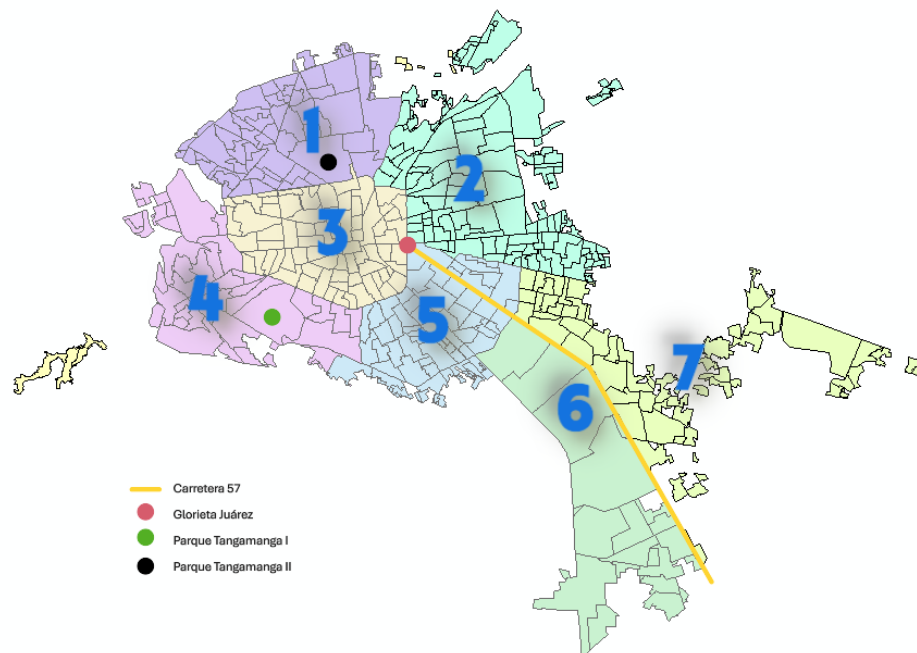
3. Ocupación:

- a. Empleado
- b. Estudiante
- c. Contratista
- d. Otro

Sección 2: Viaje de Origen-Destino

4. De acuerdo con el mapa en que área se encuentra tu domicilio.

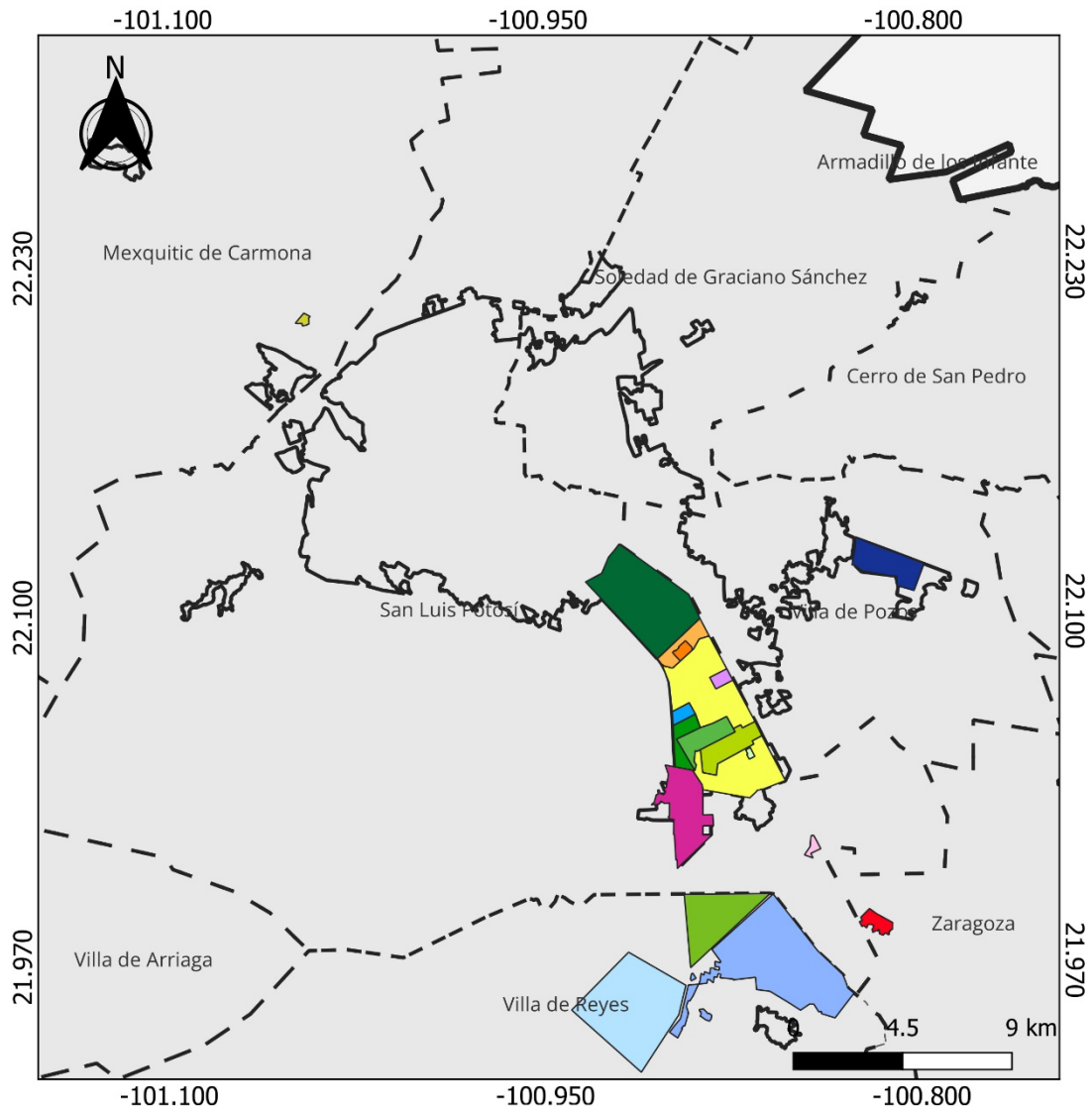
- a. 1
- b. 2
- c. 3
- d. 4
- e. 5
- f. 6
- g. 7
- h. Villa de reyes



5. De acuerdo con el mapa en que área se encuentra tu lugar de trabajo

- a. Zona Industrial del Potosí
- b. Parque 3 naciones
- c. Logistik 1
- d. Logistik 2
- e. Parque Industrial Millenium
- f. WTC
- g. Zona Industrial SLP
- h. Otro

Zona Industrial



	Zona Industrial S.L.P.		PI. Server S.L.P.		Zona Industrial Del Potosí
	PI. Provincia de Arroyos		PI. Colinas del Parque		PI. Tres Naciones
	PI. Integra		PI. del Centro		PI. Millennium
	WTC Industrial I		PI. Pueblo viejo		PI. Fundidores
	PI. Logistik I		PI. del Acero Inoxidable		PI. Impulso
	WTC Industrial II		Parque Agro Industrial		Zona Metropolitana SLP-SGS
	PI. Logistik II		PI. Interzona		Límite Municipal

6. Cuál es la duración promedio de tu viaje de ida al centro de trabajo:
- a. 5 a 20 min
 - b. 20 a 60 min
 - c. Más de 1 hora
7. Cuál es la duración promedio de tu viaje de regreso a tu domicilio:
- a. 5 a 20 min
 - b. 20 a 60 min
 - c. Más de 1 hora
8. Regularmente ¿cuál es tu horario de entrada al trabajo?
- a. 00:00 a 05:59
 - b. 06:00 a 11:59
 - c. 12:00 a 17:59
 - d. 18:00 a 23:59
9. Regularmente ¿cuál es tu horario de salida del trabajo?
- a. 00:00 a 05:59
 - b. 06:00 a 11:59
 - c. 12:00 a 17:59
 - d. 18:00 a 23:59
10. ¿Cuáles consideras que son las horas pico para realizar un viaje de la glorieta Juárez a la Zona Industrial?
- a. 6 am
 - b. 7 am
 - c. 8 am
 - d. 9 am
11. ¿Cuáles consideras que son las horas pico para realizar un viaje de la Zona Industrial con dirección al distribuidor Juárez?
- a. 4 pm
 - b. 5 pm
 - c. 6 pm
 - d. 7 pm

12. Medio principal de transporte utilizado para realizar tu viaje:
- a. Automóvil particular (carro, moto, camioneta)
 - b. Transporte público (autobús)
 - c. Caminando
 - d. Bicicleta
 - e. Transporte de la empresa
 - f. Otro
13. ¿Utilizas algún medio de transporte adicional?
- a. Si
 - b. No
 - c. En caso afirmativo ¿cuál?
14. ¿En promedio cuanto gastas diariamente en transporte (en pesos)?
- a. De 0 a 49
 - b. 50 a 99
 - c. Más de 99
15. En promedio ¿cuál es tu salario mensual (en pesos)?
- a. 8,000-13,999
 - b. 14,000-25,000
 - c. Más de 25,000
16. ¿Con qué frecuencia realiza este viaje (veces por semana)?
- a. De 1 a 3
 - b. De 4 a 6
 - c. 7
17. ¿Qué tan satisfecho está con las opciones de transporte público disponible hacia la Zona Industrial?
- a. Muy satisfecho
 - b. Satisfecho
 - c. Neutral
 - d. Insatisfecho

18. ¿Qué alternativas considera viables para disminuir el congestionamiento vehicular en la Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí?
- a. Transporte masivo
 - b. Más vialidades que conecten a la zona
 - c. Segundo piso de la carretera 57
 - d. Alternar horarios de entrada a los centros de trabajo
 - e. Otros
19. ¿Si existieran otras alternativas de transporte masivo, eficiente y asequible cambiarías tu medio de transporte?
- a. Si
 - b. No
 - c. ¿Por qué?
20. Comentarios adicionales sobre la movilidad en la Zona Industrial.

3.7 ENTREVISTAS CON ACTORES INVOLUCRADOS

Las entrevistas con actores involucrados son una herramienta valiosa para obtener información cualitativa profunda y contextualizada, lo que ayuda a tomar decisiones informadas y a desarrollar intervenciones más efectivas y adecuadas.

Para el presente estudio se realizó una serie de entrevistas a los actores involucrados en la toma de decisiones respecto a la movilidad en la zona de estudio. Además, se planea entrevistar al personal que diariamente se traslada a la zona industrial a desempeñar sus funciones laborales, para conocer sus experiencias, necesidades, expectativas y preocupaciones respecto al tema de la movilidad.

Primero se realizó una identificación de actores para así seleccionar a las personas relevantes para entrevistar, como líderes de comunidad, empleados clave, usuarios finales, expertos, etc.

Con base en el perfil del entrevistado se realizó el diseño del cuestionario, en el cual existirán preguntas abiertas y de escucha activa. Se plantea tener diferentes tipos de preguntas como de contexto, sobre experiencias, opiniones y de percepción, expectativas y necesidades.

Posteriormente se transcribieron las entrevistas en texto en formato digital y se realizó un análisis de la información.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INVENTARIO DE EMISIONES TEÓRICO.

En el año 2023, el Estado de San Luis Potosí registró una flota vehicular de 1,476,2776 vehículos, lo que representó el 3.01 % de la flota nacional, ocupando el lugar número 14 a nivel nacional (Secretaría de finanzas, 2024). A fin de tener un registro más detallado del tipo de vehículos de la flota estatal se realizó la siguiente clasificación y el número de unidades que pertenecieron a cada categoría: automóviles (772,388 unidades), camiones de pasajeros (4,143 unidades), motocicletas (281,909 unidades) y camiones o camionetas para carga (417,837 unidades). Los municipios que poseen una mayor densidad de vehículos registrados fue San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Ciudad Valles, Matehuala y Rioverde, entre estos suman un total del 65.3 % de la flota vehicular estatal.

Las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O, PM_{2.5} y CN generadas en la actividad de transporte se obtuvieron a partir del consumo del diésel, gasolina, gas LP y gas natural en el año 2022 (Tabla 1), en esta actividad se consideró el autotransporte. En el informe anual de la SENER, el consumo total de gasolina se relacionó únicamente a esta actividad. Sin embargo, el volumen de diésel, gas LP y gas natural se calculó a partir del balance entre las actividades de la industria de la manufactura y construcción, la generación de energía y en actividades residenciales y comerciales; y el consumo total de estos combustibles en el estado.

Consumo anual en metros cúbicos por tipo de combustible	
Diesel	1994245.39
Gas Lp	6305.39
Gasolina	6237649.81
Gas Natural	823064.72

Tabla 1. Datos de actividad.

Fuente: Información obtenida de Secretaría de Energía (SENER, 2023).

De acuerdo con la información del Manual estadístico del sector transporte del año 2023, los porcentajes de consumo de por tipo de combustible a nivel Estado son: 69.34 % gasolina, 28.06 % diésel, 2.58 % gas lp y 0.03 % gas natural (ver fig. 8).

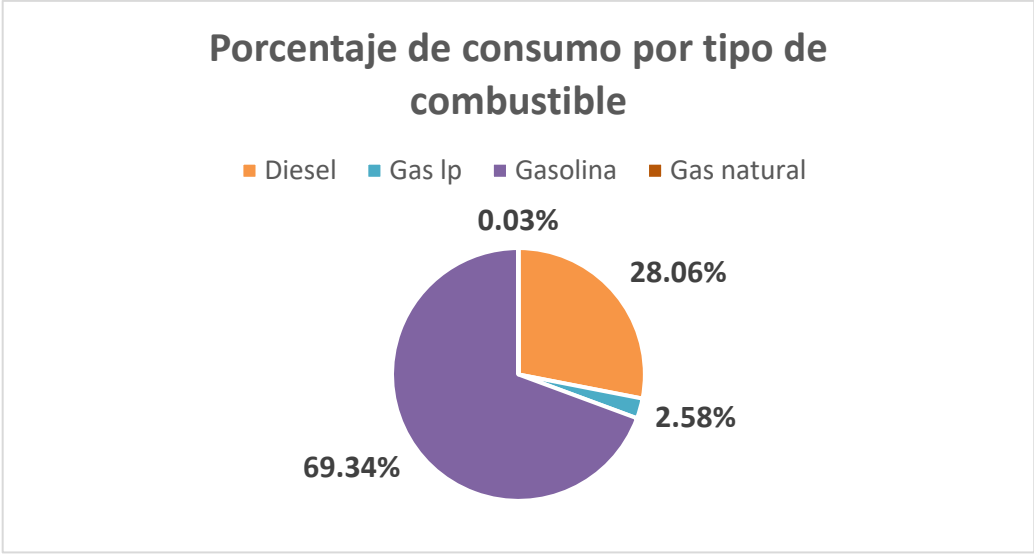


Figura 9. Porcentaje de consumo por tipo de combustible empleado (MET, 2023)

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

A partir de la información recopilada sobre la flota vehicular, actividad vehicular y especificaciones de combustible en San Luis Potosí, se estimaron las emisiones generadas por las fuentes móviles utilizando factores de emisión representativos (ver tabla 2).

Factores de emisión				
	Diesel (Kg/m ³)	Gas Natural (Kg/m ³)	Gas LP (kg/m ³)	Gasolina (Kg/m ³)
CO ₂	2823.21	1.92	1734.83	2366.36
CH ₄	114.30	0.00003680	27.49	102.44
N ₂ O	22.86	0.00003520	2.75	20.49
PM _{2.5}	0.18	0.00009120	0.060	0.16
CN	0.07	0.00004560	0.0078	0.06

Tabla 2. Factores de emisión.

Fuente: (EPA, 2009)

Dando como resultado un total de 20,403,243 toneladas de CO₂ emitidas (ver tabla 3) para todo el parque vehicular del estado y 4 tipos de combustible empleados.

Datos de actividad		Emisiones de contaminantes (toneladas)				
Combustible	(m ³)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PM _{2.5}	CN
Diesel	1,994,245.38	5,630,173.51	227,942.25	45,588.45	358.96	143.59
Gas lp	6305.39	10,938.78	173.36	30.07	0.01	0.00
Gasolina	6,237,649.81	14,760,549.96	638,984.85	127,796.97	973.07	389.23
Gas natural	823,064.72	1580.28	0.03	0.03	0.08	0.04
Total		20,403,243	867,100	173,416	1,332	533

Tabla 3. Emisiones de los principales contaminantes en el año 2023.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida.

Estos valores se compararon con los del inventario de emisiones del 2016 (ver tabla 4) para validar que los datos obtenidos son similares. Es importante mencionar que en el año 2016 el parque vehicular según datos de INEGI era de un total de 1,074,426 vehículos a nivel estado.

Teniendo los 2 inventarios del año 2023 y 2016, se realizó una relación de los vehículos totales y las emisiones generadas, con los datos en específico de la zona de estudio de la cantidad de vehículos que transitan diariamente (TDPA) por ahí y el porcentaje al que equivale del total de vehículos a nivel estado (ver tabla 5).

Datos de actividad		Emisiones de contaminantes (toneladas)				
Combustible	(m ³)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PM _{2.5}	CN
Gas Lp	85,968.22	140713.64	138.41	0.86	5.16	0.67
Gasolina	8,073,391	19104581.51	6539.45	2099.08	1259.45	503.78
Diesel	1,661,554	4426213	233	233	299	120
Gas natural	1,4049,552	30347.03	49.74	2.11	1.28	0.64
	Total	23,701,855	6,960	2,335	1,565	625

Tabla 4. Emisiones de los principales contaminantes en el año 2016.

Fuente: Inventario de emisiones San Luis Potosí, 2016.

En la tabla 5, se puede observar que el Transito diario promedio anual se ha duplicado en el año 2023 comparación con el del 2016. Mientras que el porcentaje de vehículos ha aumentado del 4.5 % respecto al total de vehículos a nivel estado que se presentaba en el año 2016 a un 6.8% que se presentó en el año 2023.

AÑO	TDPA TRANSITO DIARIO PROMEDIO ANUAL	TOTAL, DE VEHICULOS EN TODO EL ESTADO	PORCENTAJE DE VEHÍCULOS QUE TRANSITAN LA 57 RESPECTO AL TOTAL DE VEHICULOS EN EL ESTADO
2023	100,133	1,476,277	6.8
2016	48,585	1,074,426	4.5

Tabla 5. Comparación entre el TDPA y el total de vehículos en el año 2016 y 2023.

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se lograron obtener las concentraciones de contaminantes por tonelada emitidos por fuentes móviles en la zona de estudio del año 2016 y 2023 (ver tabla 6).

AÑO	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PM _{2.5}	CN
2016	1,071,786	315	106	71	28
2023	1,362,335	363	129	90	36

Tabla 6. Comparación entre las toneladas de contaminantes emitidos en el año 2016 y 2023.

Fuente: Elaboración propia

Asi mismo, con datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del año 2023, se dividieron todos los transportes que transitan por la zona de estudio en 3 categorías (ver fig. 10):

- A. Automóviles y motos con un total de 95,219.8 con un porcentaje de 95%.
- B. Autobuses con un total de 701.6 y un porcentaje de 1%.
- C. Camiones y otros con un total de 7,126.6 y un porcentaje del 4%.

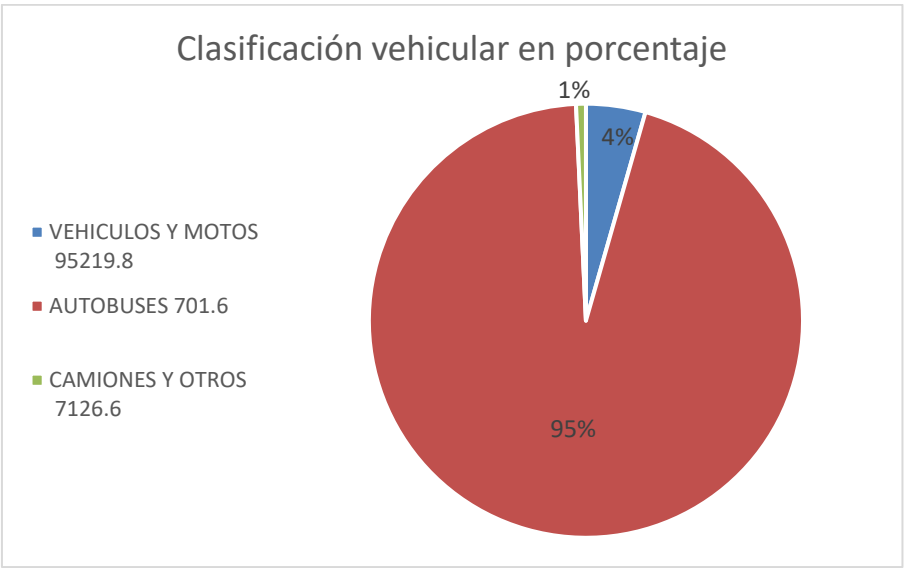


Figura 10. Porcentaje por tipo de vehículo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

4.2 ENCUESTAS A TRABAJADORES DE LA ZONA INDUSTRIAL.

La encuesta se aplicó en formato digital a un total de 405 trabajadores, seleccionados de manera aleatoria, que realizan sus actividades dentro de la Zona Industrial de San Luis Potosí. La difusión de la encuesta se realizó a través de redes sociales. Su aplicación fue un elemento clave para obtener información relevante sobre los patrones de viaje, así como para identificar la problemática relacionada con la movilidad en esta área. Los datos recopilados permiten comprender con mayor precisión las necesidades de desplazamiento de los trabajadores y sirven como base para el análisis y la propuesta de mejoras en la movilidad de la zona.

La primera pregunta de la encuesta se enfocó en identificar el rango de edad de los participantes. Como se observa en la Fig. 11, los grupos con mayor representación son los de 31 a 45 años, que constituyen el 46%, y los de 18 a 30 años, que representan el 45%, concentrando en conjunto más del 90% de la muestra total. En contraste, los rangos de 46 a 59 años (8%) y más de 60 años (1%) muestran una participación notablemente menor, lo que evidencia que la población encuestada está compuesta predominantemente por personas jóvenes y de mediana edad.

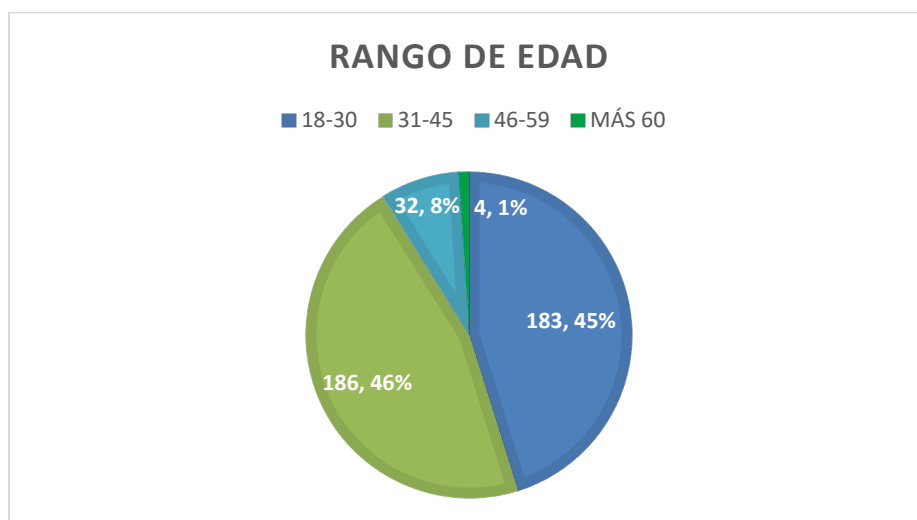


Figura 11. Rango de edad de los trabajadores encuestados

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

La distribución de género que muestra la figura 12 evidencia que el 55% de las personas encuestadas son del género masculino, mientras que el 44% se identifican como femeninas. Solo un 1% prefirió no responder. Estos resultados reflejan una participación relativamente equilibrada entre hombres y mujeres, con una ligera mayoría masculina y una mínima proporción de personas que optaron por no declarar su género.

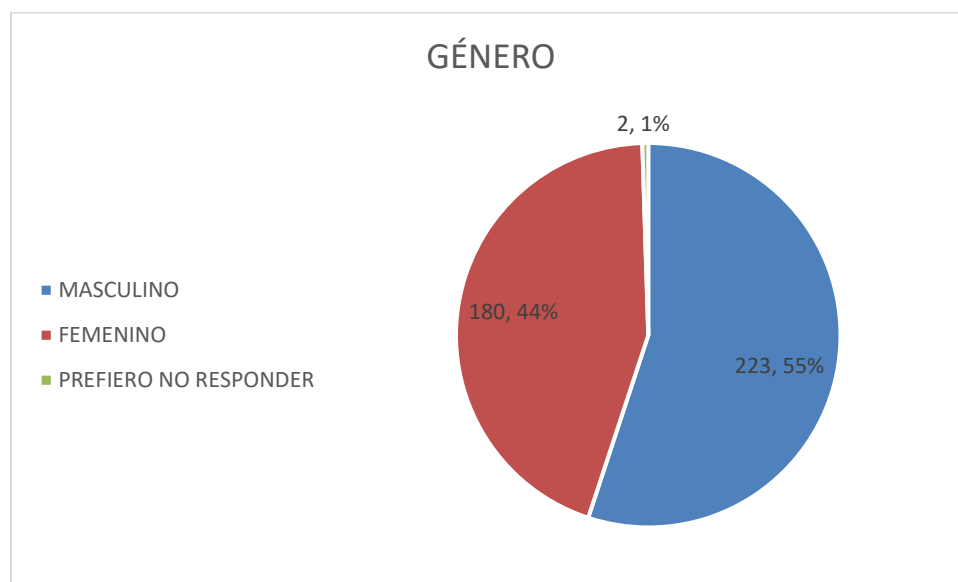


Figura 12. Género de los trabajadores encuestados.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

La figura 13, ocupación muestra que la mayor parte de los participantes pertenece al sector laboral formal dentro de la zona de estudio. En particular, el 85 % corresponde a empleados, lo que refleja que la muestra está compuesta principalmente por personas que realizan actividades laborales regulares dentro de las instalaciones o empresas de la zona industrial.

El segundo grupo más representativo es el de los contratistas (7 %), quienes también tienen presencia relevante debido al dinamismo de servicios externos en la zona.

En proporciones menores se encuentran los estudiantes (5 %) y los proveedores (2 %), lo cual indica una participación mínima de población flotante o visitantes ocasionales. Finalmente, el grupo de choferes (1 %) representa una fracción muy pequeña de la ocupación reportada.

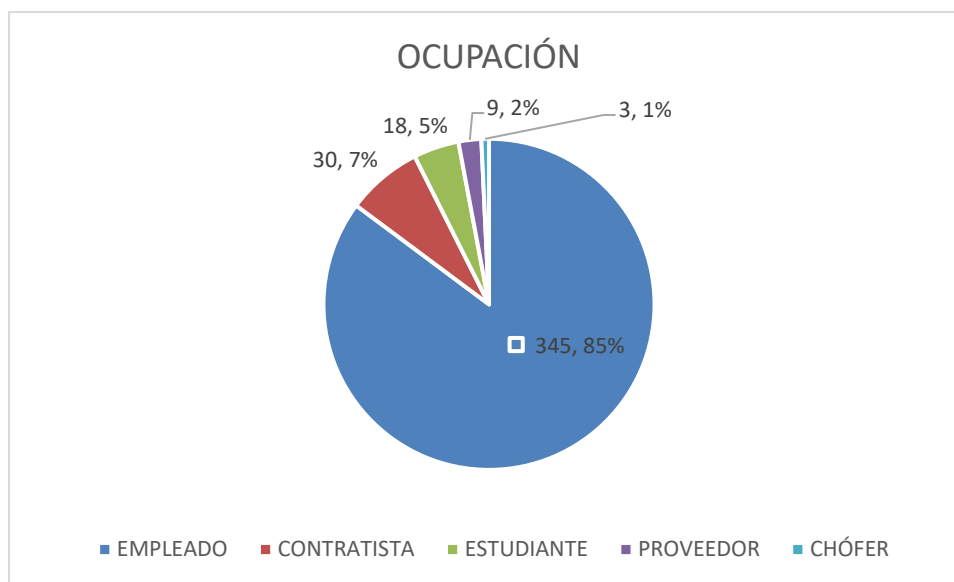


Figura 13. Ocupación de los trabajadores encuestados.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

La distribución espacial del domicilio de los encuestados evidencia una concentración diferenciada de la población según las áreas urbanas definidas en la zona metropolitana de San Luis Potosí. De acuerdo con los datos obtenidos se observan patrones significativos que permiten identificar las zonas de mayor origen de desplazamientos hacia la zona industrial.

El mayor porcentaje de participantes proviene del área 5 (22.7 %), ubicada en la zona sur-central de la ciudad muy cerca de la zona industrial. Esta área se caracteriza por ser un corredor habitacional consolidado y con acceso directo a la Carretera 57, principal vía de conexión hacia la zona industrial. Su alta representación confirma la importancia de este sector como punto de origen frecuente para la movilidad cotidiana laboral.

En segundo lugar, destacan el área 2 (19.8 %) y el área 7 (18.8 %), ambas con proporciones elevadas de residentes. El área 2, situada en la zona norte-oriental, concentra una parte significativa de la población trabajadora que se desplaza diariamente hacia el centro y sur del municipio. Por su parte, el área 7 corresponde a los asentamientos localizados al oriente y sureste de la ciudad, donde se ha registrado un crecimiento habitacional acelerado en los últimos años, este crecimiento es atribuido a su cercanía con la zona industrial.

El área 3 (14.6 %), correspondiente al centro del municipio, también presenta una participación relevante. Este resultado es coherente con su densidad poblacional y su papel como nodo urbano con múltiples conexiones viales hacia las zonas industriales.

En contraste, los porcentajes más bajos se registran en las áreas 1 (7.7 %) y 6 (7.9 %), ubicadas al norte y al sur del municipio, respectivamente. Aunque forman parte de zonas habitacionales establecidas, su contribución es menor en comparación con las áreas de mayor densidad o crecimiento reciente. El bajo porcentaje de ocupación en el área 6 se debe a que el uso de suelo es principalmente industrial lo que impacta en el bajo porcentaje de ocupación habitacional. El área 4 (6.9 %) presenta el porcentaje más bajo entre las áreas urbanas delimitadas, lo cual refleja una menor participación de residentes provenientes del sector poniente de la ciudad.

Finalmente, Villa de Reyes representa únicamente el 1.7 % de los encuestados, lo cual indica que, aunque existe participación desde este municipio, relevante por su vinculación directa con el corredor industrial, su presencia en la muestra es limitada. Sin embargo, las tendencias apuntan a que el municipio debido a su cercanía y ubicación de parques industriales actualmente se encuentra en crecimiento y ha incrementado su densidad poblacional en los últimos años.

En conjunto, estos resultados muestran que los flujos de movilidad hacia la zona industrial provienen principalmente de las áreas 5, 2 y 7, las cuales concentran más del 60 % de los domicilios reportados. Esta concentración territorial del origen de los viajes es fundamental para comprender los patrones de desplazamiento, los tiempos de traslado y el impacto asociado a las emisiones generadas por fuentes móviles en los corredores viales estratégicos del municipio.

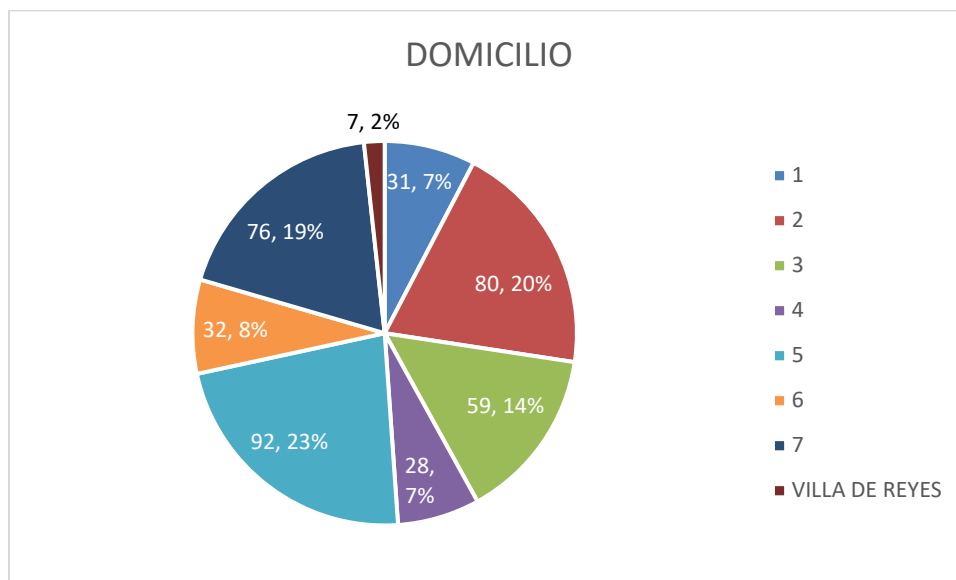


Figura 14. Ubicación de domicilio.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

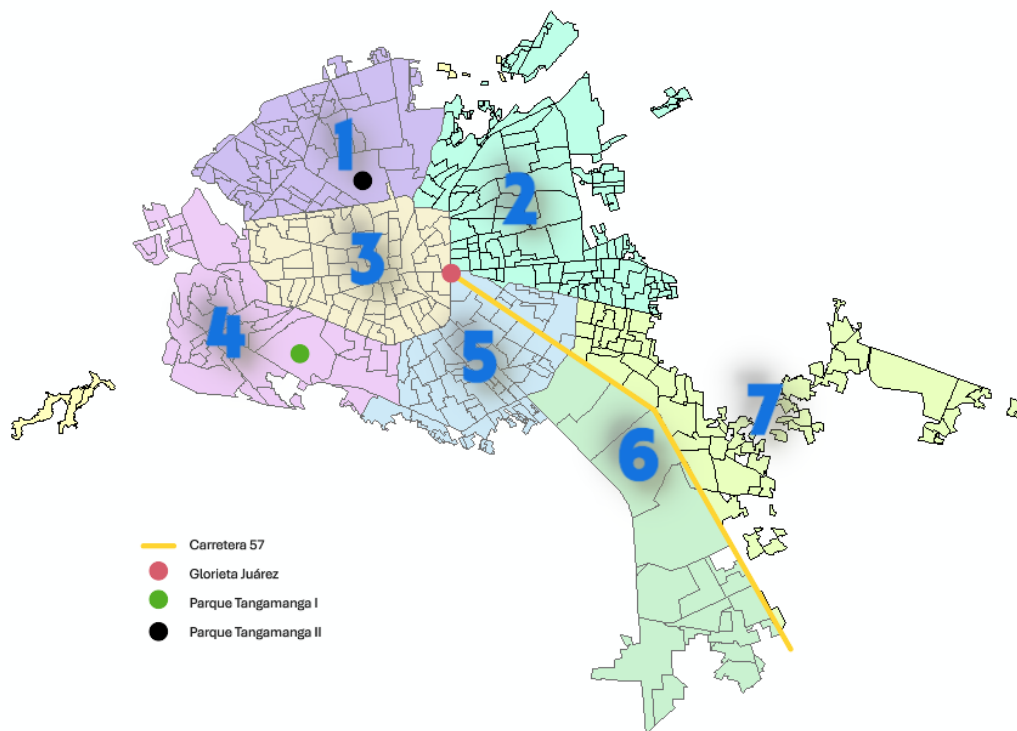


Figura 15. División de la ciudad por áreas.

Fuente: Elaboración propia.

Las respuestas obtenidas en la pregunta “De acuerdo con el mapa, ¿en qué área se encuentra tu lugar de trabajo?” muestran una clara concentración de los centros laborales dentro de los polígonos que conforman la Zona Industrial de San Luis Potosí, tal como se observa en el mapa oficial. La distribución espacial representada en el mapa coincide plenamente con los resultados de la encuesta ilustrados en la gráfica de ubicación del centro de trabajo.

La Zona Industrial S.L.P., señalada en el mapa con el color verde oscuro, es el polígono más extenso y de mayor antigüedad dentro del corredor industrial. Esta zona también fue la más mencionada por los trabajadores, con 116 respuestas, lo que confirma su papel como núcleo histórico y principal punto de concentración de empleo en la región.

En segundo lugar, destacan los parques WTC Industrial I y II, representados en color azul en el mapa. Estas áreas, ubicadas estratégicamente hacia el oriente del corredor, fueron identificadas por 66 trabajadores en el caso de WTC I y por 5 trabajadores en WTC II. Esta distribución corresponde a su crecimiento reciente y a la presencia de diversas empresas de logística, manufactura y tecnologías.

Asimismo, los parques Logistik I y Logistik II, mostrados en verde claro y verde medio en el mapa concentran una parte importante de los centros de trabajo encuestados, con 28 y 63 respuestas, respectivamente. Su posición al sur del corredor industrial y su conexión directa con la Carretera 57 refuerzan su relevancia como polos laborales emergentes.

El Parque Tres Naciones, identificado en color azul claro en el mapa, fue mencionado por 54 trabajadores, lo que coincide con su crecimiento en los últimos años y su ubicación estratégica en la zona oriente. De manera similar, parques como Fundidores, Impulso, Colinas del Parque e Interzona, representados con diversos colores en el mapa, también aparecen en las respuestas, aunque con menor frecuencia, reflejando una dispersión moderada del empleo dentro del corredor industrial.

En conjunto, tanto la gráfica como el mapa evidencian que los trabajadores se concentran de manera predominante en los parques alineados longitudinalmente a lo largo de la Carretera 57, conformando un eje industrial continuo que inicia en la zona conurbada de San Luis Potosí–Soledad y se extiende hasta el municipio de Villa de Reyes.

Esta distribución territorial explica la fuerte dependencia de la población trabajadora hacia este corredor, así como los patrones de movilidad que derivan en congestionamientos vehiculares recurrentes. La combinación de ambas representaciones permite comprender visual y numéricamente la localización de los centros de trabajo y su impacto directo en la dinámica de traslado de los trabajadores encuestados.

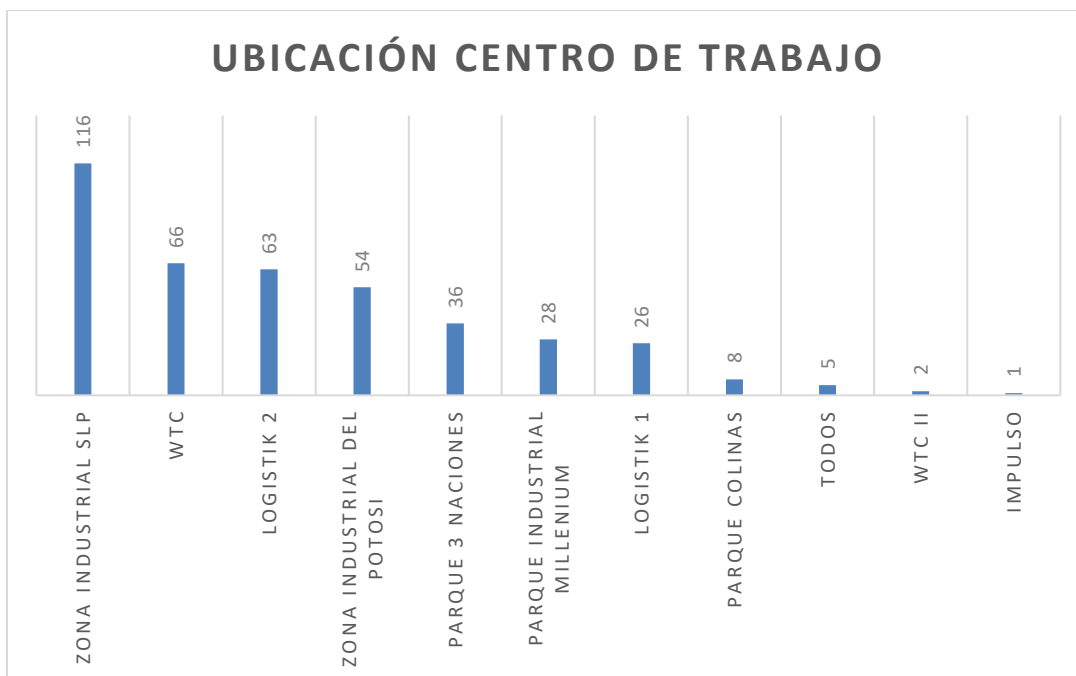


Figura 16. Ubicación de centro de trabajo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

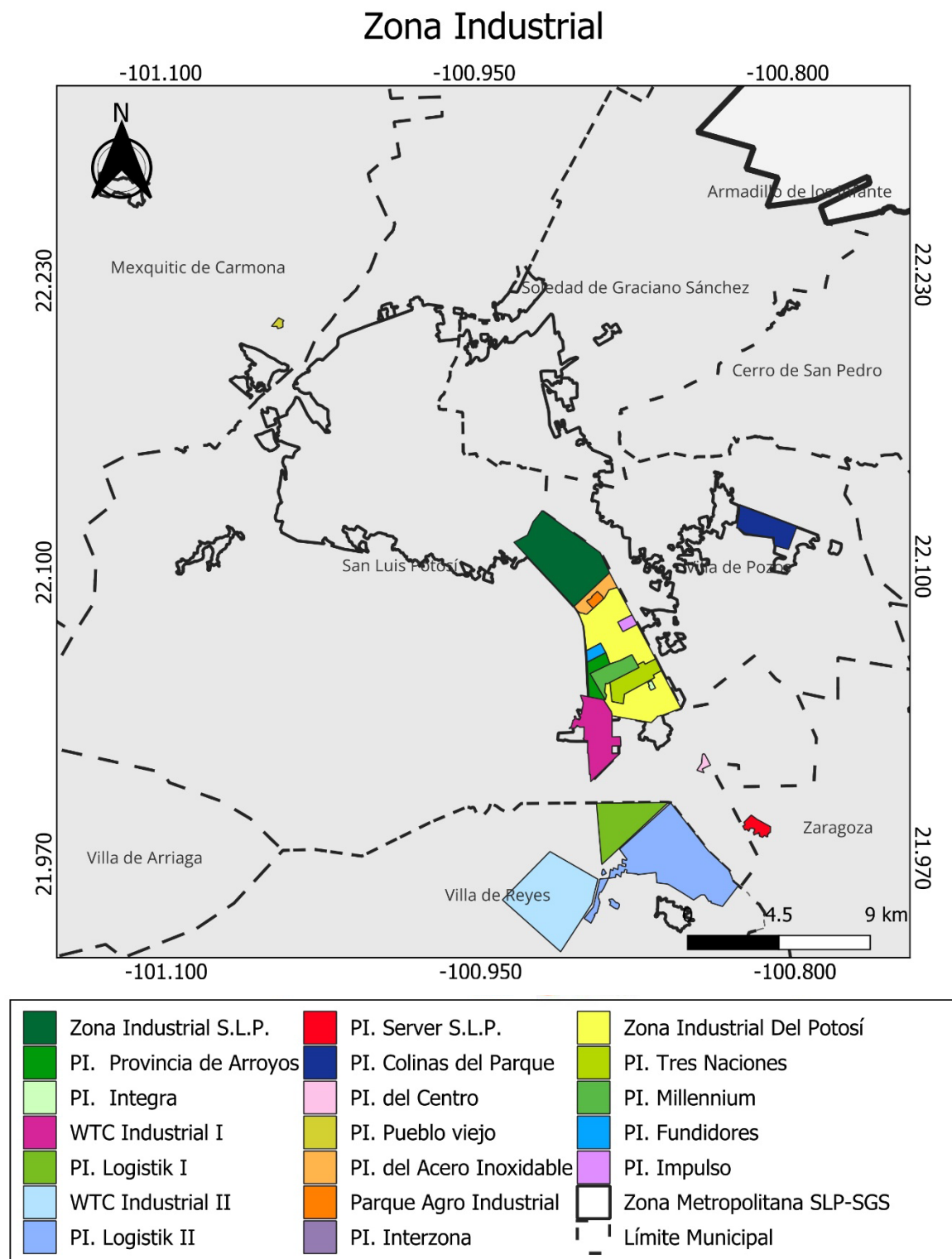


Figura 17. División de la zona industrial de SLP.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada a los trabajadores de la Zona Industrial de San Luis Potosí muestran que el tiempo de traslado al centro de trabajo es considerablemente elevado para una proporción importante de la población encuestada, lo cual evidencia una problemática relevante en términos de movilidad urbana.

De acuerdo con la información recopilada, 281 trabajadores, que representan la mayoría de los encuestados, reportaron un tiempo de traslado de 21 a 60 minutos para llegar a su centro de trabajo. Este resultado indica que más de la mitad de los trabajadores enfrenta recorridos prolongados diariamente, asociados principalmente a la congestión vehicular en los accesos a la Zona Industrial, en particular sobre la Carretera 57.

Por otro lado, 72 trabajadores señalaron que su tiempo de traslado es de más de una hora, lo que refleja una condición aún más crítica de movilidad. Este grupo representa una proporción significativa del total de la muestra y pone de manifiesto la existencia de trayectos largos, ya sea por la distancia entre el lugar de residencia y el centro de trabajo, o por las condiciones de tráfico que prevalecen durante los horarios de entrada laboral.

En contraste, únicamente 52 trabajadores indicaron realizar su traslado en un intervalo de 5 a 20 minutos, lo que sugiere que solo una fracción reducida de la población encuestada reside en zonas cercanas a su lugar de trabajo o cuenta con rutas de acceso más eficientes.

La distribución observada en la gráfica confirma que la mayor parte de los trabajadores dedica entre 21 minutos y más de una hora diaria para desplazarse desde su domicilio hasta la Zona Industrial, situación que tiene implicaciones directas en la generación de emisiones por fuentes móviles, debido al incremento en el tiempo de operación de los vehículos, las condiciones de tráfico lento y los periodos de detención prolongada.

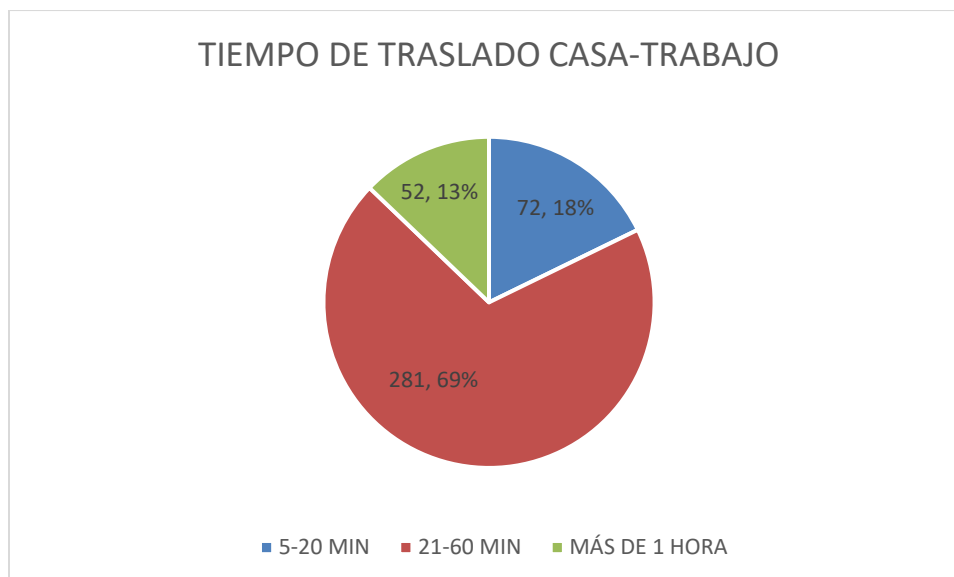


Figura 18. Tiempo de traslado casa-trabajo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

El análisis de los tiempos de traslado correspondientes al recorrido del centro de trabajo al hogar permite identificar que una parte significativa de los trabajadores enfrenta desplazamientos prolongados al finalizar su jornada laboral.

Los resultados muestran que 246 personas reportaron un tiempo de recorrido ubicado en el intervalo de 21 a 60 minutos, lo que indica que, para la mayoría de los encuestados, el trayecto de regreso se realiza bajo condiciones de movilidad intermedia a alta, posiblemente asociadas a la concentración de flujos vehiculares en horarios de salida.

De manera relevante, 103 trabajadores señalaron que su traslado supera una hora, lo que pone de manifiesto la existencia de recorridos largos y condiciones de congestión persistentes en el retorno al domicilio. Este comportamiento puede relacionarse con la localización periférica de algunas zonas habitacionales y con la saturación de las principales vialidades que conectan la Zona Industrial con el resto de la ciudad.

En contraste, un grupo reducido de 56 trabajadores indicó que su tiempo de desplazamiento es inferior a 20 minutos, lo que sugiere una mayor proximidad entre el centro de trabajo y el lugar de residencia o el uso de rutas con menor carga vehicular.

En términos generales, la distribución de los tiempos de traslado de regreso evidencia que la movilidad en sentido salida de la Zona Industrial presenta condiciones similares de congestión a las del trayecto de ida, contribuyendo de manera relevante a la permanencia de flujos vehiculares elevados y, por ende, al impacto acumulado de las fuentes móviles sobre la calidad del aire.

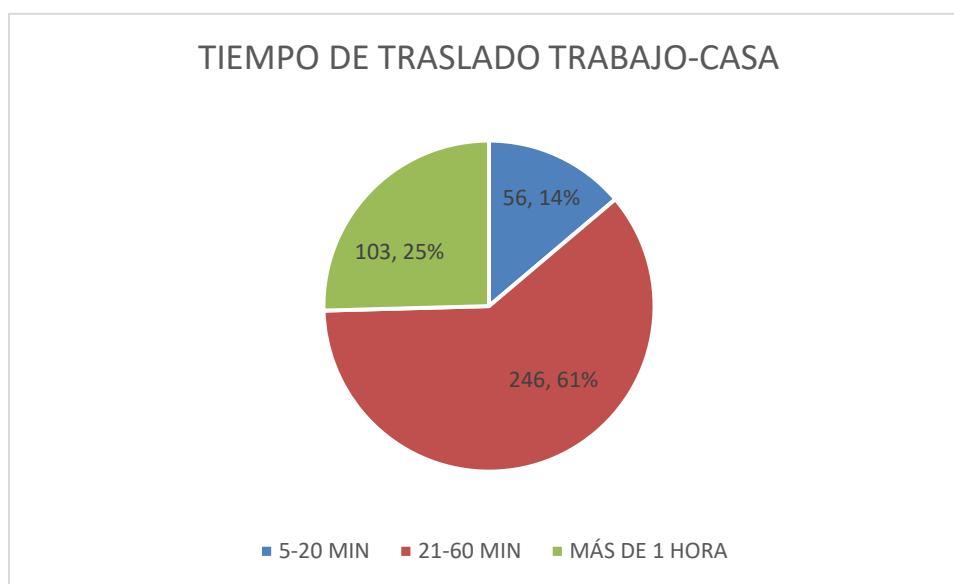


Figura 19. Tiempo de traslado trabajo-casa.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Los resultados relacionados con el horario habitual de entrada al centro de trabajo muestran una clara concentración de trabajadores en el turno matutino. La mayoría de los encuestados indicó iniciar su jornada laboral entre las 06:00 y las 11:59 horas, intervalo que agrupa a 378 personas, lo que evidencia que la actividad laboral en la zona industrial se activa principalmente durante las primeras horas del día.

En menor proporción, 19 trabajadores reportaron horarios de entrada en la madrugada, entre 00:00 y 05:59 horas, lo que sugiere la presencia de algunos turnos nocturnos o esquemas laborales especiales. Por otro lado, los horarios vespertinos presentan una participación muy reducida: únicamente 7 encuestados señalaron ingresar entre 12:00 y 17:59 horas, mientras que solo 1 persona indicó comenzar su jornada entre 18:00 y 23:59 horas.

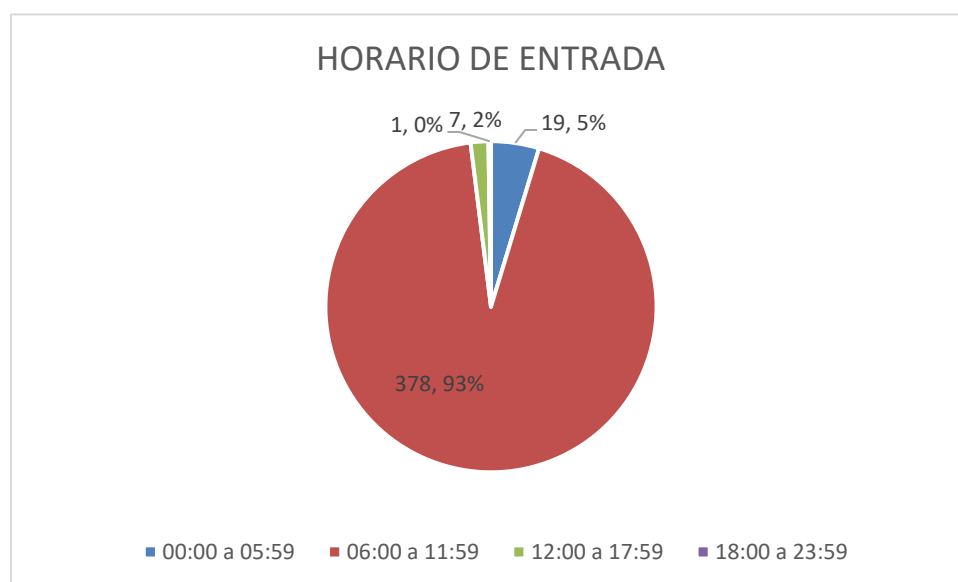


Figura 20. Horario de entrada al centro de trabajo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

En cuanto al horario habitual de salida del centro de trabajo, los resultados reflejan una mayor dispersión de los tiempos de término de la jornada laboral en comparación con los horarios de entrada. El intervalo con mayor número de respuestas corresponde al periodo de 12:00 a 17:59 horas, en el cual 220 trabajadores indicaron concluir sus actividades, lo que sugiere la presencia de turnos diurnos y esquemas laborales con jornadas parciales o escalonadas.

El segundo intervalo con mayor frecuencia es el comprendido entre 18:00 y 23:59 horas, reportado por 120 encuestados, lo que indica que una proporción relevante de trabajadores finaliza su jornada en horarios vespertinos o nocturnos, coincidiendo con un segundo periodo potencial de alta demanda en la red vial.

Por su parte, 41 personas señalaron salir entre 06:00 y 11:59 horas, lo que puede asociarse con turnos nocturnos que concluyen por la mañana, mientras que 24 trabajadores indicaron horarios de salida durante la madrugada, entre 00:00 y 05:59 horas, reflejando la existencia de actividades continuas o turnos especiales dentro de la zona industrial.

La distribución observada evidencia que los flujos de salida laboral se extienden a lo largo del día, generando múltiples periodos de desplazamiento que pueden influir en la dinámica del tránsito y, por ende, en la generación de emisiones vehiculares en el área de estudio.

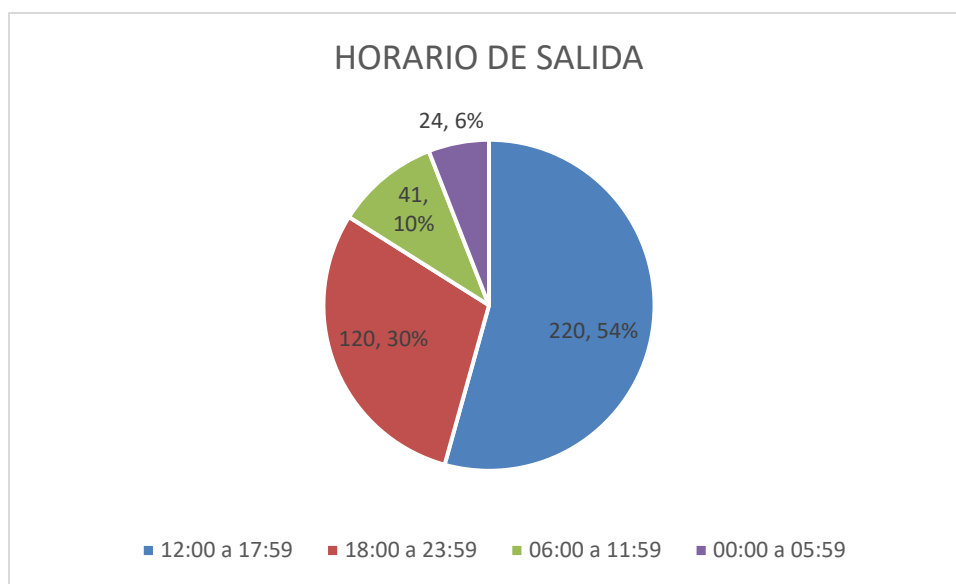


Figura 21. Horario de salida del centro de trabajo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

En relación con la percepción de las horas de mayor congestión vehicular para realizar el trayecto desde la glorieta Juárez hacia la Zona Industrial, los resultados muestran una clara concentración en las primeras horas de la mañana. La mayor parte de las personas encuestadas identificó las 7:00 a.m. como el principal periodo de saturación vial, al concentrar 215 respuestas, lo que la posiciona como la hora pico más crítica para este desplazamiento.

En segundo lugar, se ubica el horario de las 8:00 a.m., con 126 respuestas, lo que indica que las condiciones de tráfico intenso se mantienen durante este intervalo, aunque con una ligera disminución respecto al pico máximo. El horario de las 6:00 a.m. también fue señalado por una proporción relevante de encuestados (56 respuestas), sugiriendo que el incremento en la demanda vehicular inicia desde etapas tempranas de la mañana.

Por el contrario, el horario de las 9:00 a.m. fue identificado como hora pico por un número reducido de participantes (8 respuestas), lo que sugiere que, para ese momento, el flujo vehicular tiende a normalizarse de manera progresiva. En conjunto, estos resultados evidencian que la congestión en este corredor se concentra principalmente entre las 6:00 y 8:00 a.m., coincidiendo con los horarios de entrada laboral de la mayoría de los trabajadores de la Zona Industrial.

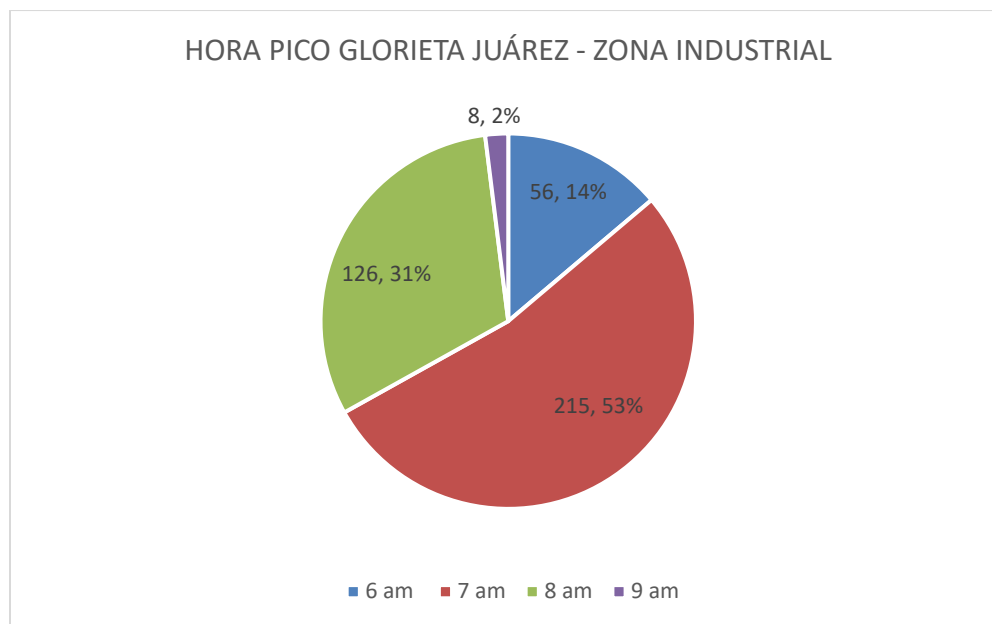


Figura 22. Hora pico trayecto Glorieta Juárez-Zona industrial.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Respecto a la identificación de las horas de mayor congestión vehicular para el trayecto con dirección de la Zona Industrial hacia el Distribuidor Juárez, los resultados señalan que el periodo crítico se concentra principalmente durante la tarde-noche, en concordancia con los horarios de salida laboral.

El horario más señalado por las personas encuestadas corresponde a las 6:00 p.m., al registrar 191 respuestas, lo que indica que este intervalo representa el punto de mayor saturación vial en este sentido de circulación. En segundo lugar, se ubica el horario de las 5:00 p.m., con 148 respuestas, lo que sugiere que el incremento del flujo vehicular inicia desde horas previas al pico máximo.

Por su parte, el horario de las 4:00 p.m. fue identificado por 37 encuestados, reflejando una etapa temprana del aumento progresivo en la demanda de movilidad, mientras que las 7:00 p.m. registraron el menor número de respuestas (29), lo que indica una disminución gradual de la congestión conforme avanza la noche.

En conjunto, estos resultados evidencian que la congestión vehicular en el trayecto de salida de la Zona Industrial hacia el Distribuidor Juárez se concentra principalmente entre las 5:00 y 6:00 p.m., periodo que coincide con la finalización de la jornada laboral de una proporción significativa de trabajadores, generando una alta demanda simultánea de desplazamientos.

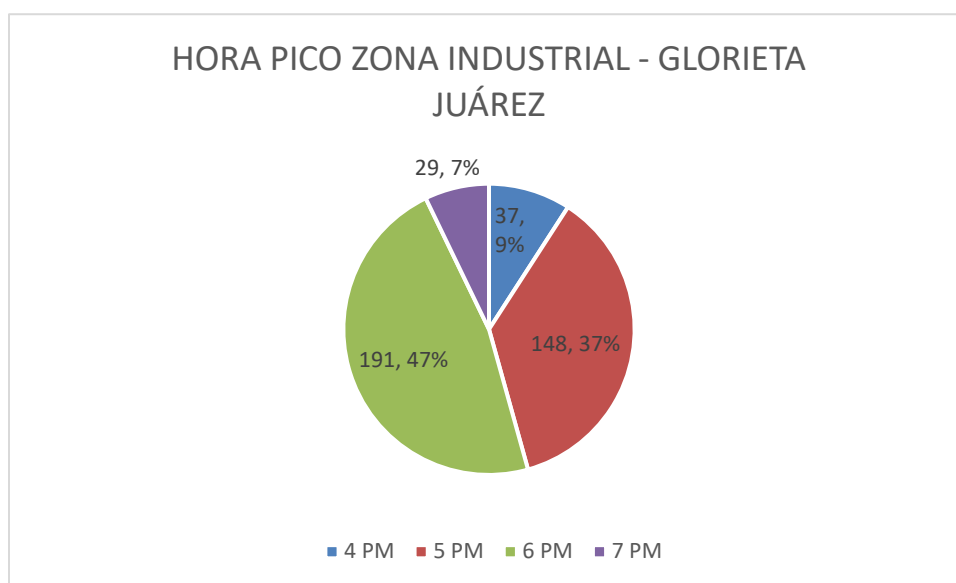


Figura 23. Hora pico trayecto Glorieta Juárez-Zona industrial.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

En relación con el medio de transporte utilizado para realizar el viaje cotidiano al centro de trabajo, los resultados muestran una clara predominancia del automóvil particular, ya sea en forma de carro, motocicleta o camioneta. Este modo concentra la mayor parte de las respuestas, con un total de 280 trabajadores, lo que evidencia una fuerte dependencia del transporte motorizado individual para los desplazamientos hacia la Zona Industrial.

En segundo lugar, se identifica el transporte proporcionado por la empresa, con 102 respuestas, lo que sugiere que, aunque existe una alternativa colectiva organizada, su alcance resulta limitado frente al uso del vehículo particular. Por su parte, el transporte público (autobús) presenta una participación considerablemente menor, con únicamente 18 personas, reflejando una baja preferencia o posibles deficiencias en la cobertura, frecuencia o tiempos de traslado asociados a este modo.

Los medios no motorizados muestran una presencia marginal dentro de la muestra analizada. El uso de la bicicleta y los desplazamientos a pie registran apenas 2 respuestas cada uno, mientras que servicios de transporte por aplicación, como Uber, aparecen de forma casi inexistente, con 1 respuesta. Esta distribución pone de manifiesto que las alternativas sustentables y de movilidad activa no representan una opción relevante para la mayoría de los trabajadores encuestados.

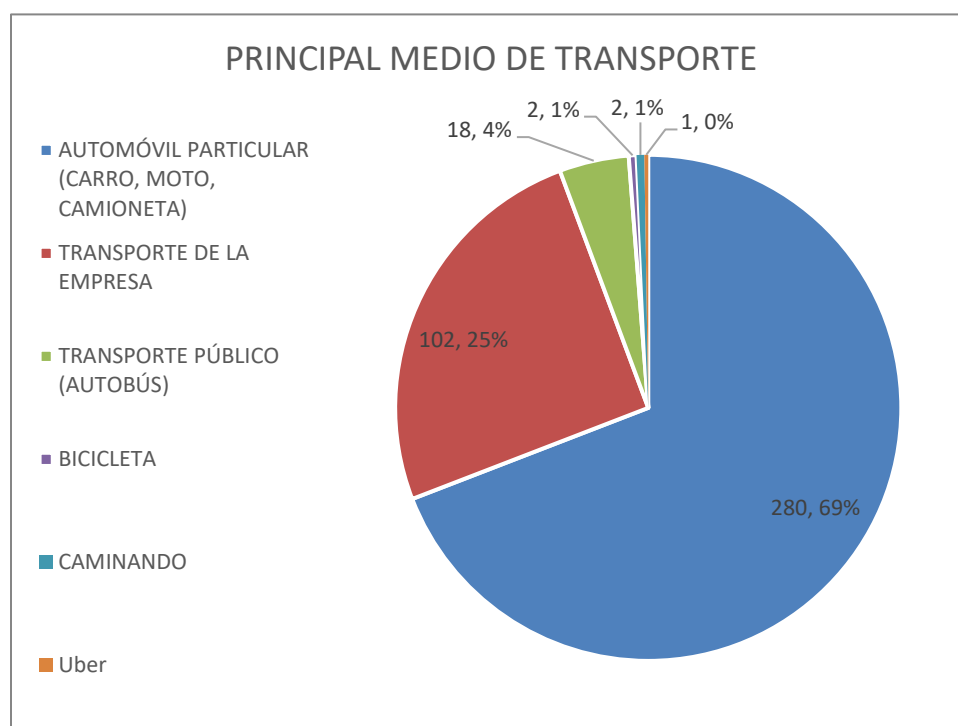


Figura 24. Principal medio de transporte.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Respecto al uso de medios de transporte adicionales durante el trayecto cotidiano al centro de trabajo, los resultados indican que la mayoría de los encuestados no recurre a un modo complementario. En total, 308 personas señalaron que realizan su desplazamiento utilizando un solo medio de transporte, lo que sugiere trayectos directos sin necesidad de combinaciones modales.

No obstante, un grupo menor de trabajadores (97 respuestas) manifestó que sí utiliza algún transporte adicional, lo cual evidencia la existencia de recorridos más complejos que pueden implicar transbordos o la combinación de distintos modos para completar el viaje. De este subconjunto, únicamente 16 encuestados especificaron cuál es el medio adicional utilizado, lo que limita un análisis más detallado sobre la naturaleza de estas combinaciones.

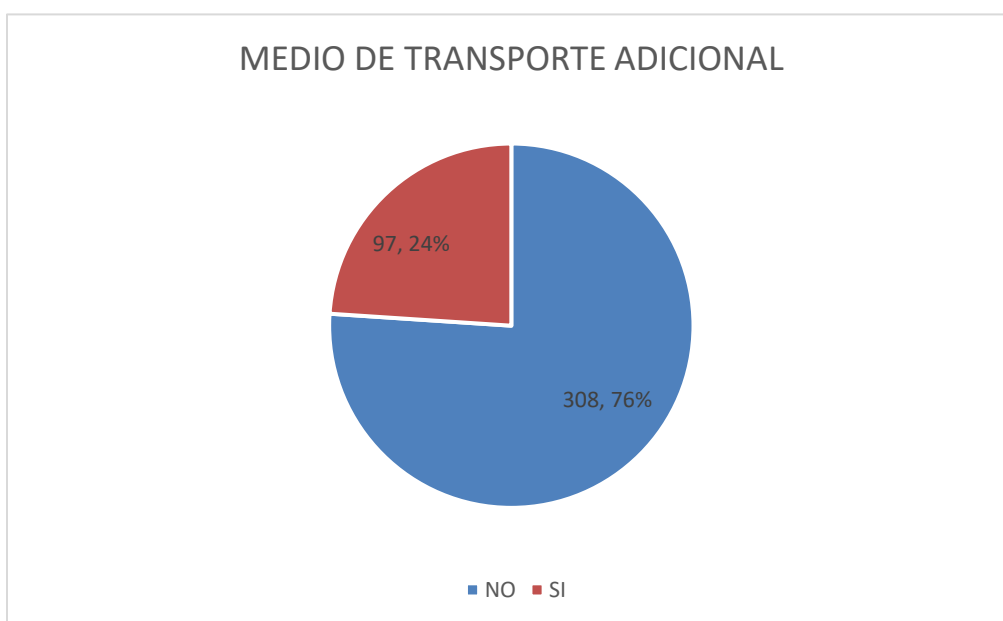


Figura 25. Medio de transporte adicional.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Los resultados con respecto a el gasto diario destinado al transporte muestran una distribución relativamente equilibrada entre los distintos rangos de gasto considerados. El grupo más numeroso corresponde a las personas que destinan entre 0 y 49 pesos diarios, con un total de 160 respuestas, lo que sugiere que una parte importante de los trabajadores logra mantener costos de traslado relativamente bajos, posiblemente asociados a distancias cortas, uso de transporte proporcionado por la empresa o esquemas de viaje compartido.

Por otro lado, 137 encuestados señalaron un gasto entre 50 y 99 pesos diarios, reflejando un nivel intermedio de inversión económica en movilidad, característico de trayectos de mayor distancia o del uso regular de transporte motorizado. Finalmente, 108 personas reportaron un gasto superior a 99 pesos diarios.

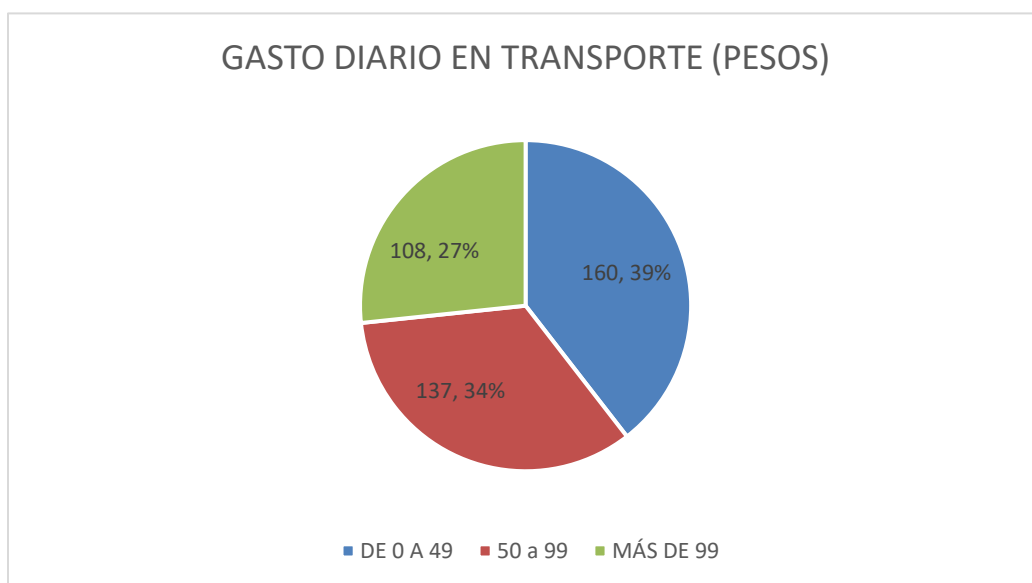


Figura 26. Gasto diario en transporte por parte de los trabajadores de la zona.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Para el promedio de salario mensual de los trabajadores encuestados, los resultados muestran una distribución relativamente equilibrada entre los distintos rangos de ingreso. El grupo con mayor frecuencia corresponde a quienes perciben un salario mensual de 14,000 a 25,000 pesos, con 164 respuestas, lo que indica que una proporción importante de la población ocupada en la Zona Industrial se concentra en un nivel de ingreso medio.

Por otra parte, 130 encuestados reportaron percibir un ingreso superior a 25,000 pesos mensuales, lo que refleja la presencia de trabajadores con mayores niveles de especialización o antigüedad dentro del sector industrial. En contraste, 111 personas señalaron un salario mensual en el rango de 8,000 a 13,999 pesos, representando al grupo con menor nivel de ingresos dentro de la muestra analizada.

Esta distribución salarial permite contextualizar los resultados asociados al gasto diario en transporte, ya que los niveles de ingreso influyen directamente en la elección del medio de transporte, la capacidad de absorber costos asociados a la movilidad y, en algunos casos, la dependencia del automóvil particular.

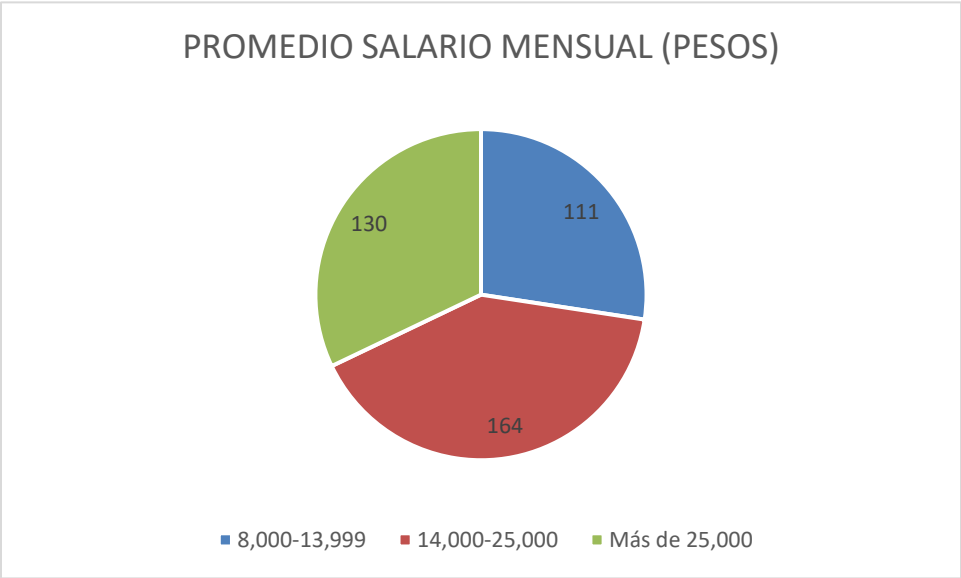


Figura 27. Salario promedio (por mes) de los trabajadores de la zona.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Los resultados muestran que la mayoría de las personas encuestadas realiza el trayecto hacia su centro de trabajo de manera recurrente a lo largo de la semana. En particular, 313 trabajadores indicaron efectuar el viaje entre 4 y 6 veces por semana, lo que refleja un patrón asociado a jornadas laborales regulares de lunes a viernes o con esquemas de turnos continuos.

Por otro lado, 47 encuestados señalaron realizar el viaje únicamente de 1 a 3 veces por semana, lo cual puede estar relacionado con esquemas de trabajo flexible, rotación de turnos o modalidades mixtas de asistencia presencial. Finalmente, 45 personas manifestaron efectuar el trayecto los 7 días de la semana, evidenciando la existencia de actividades laborales con operación continua o sin días de descanso fijo.

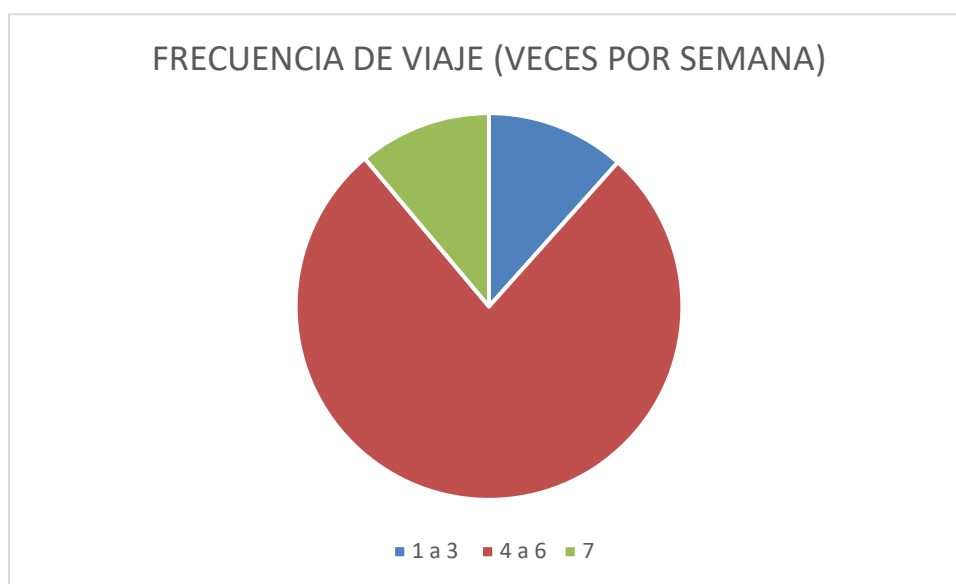


Figura 28. Frecuencia de viaje (por semana) casa-trabajo.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Los resultados obtenidos evidencian una percepción mayoritariamente desfavorable respecto a las opciones de transporte público disponibles para el traslado hacia la Zona Industrial. Del total de personas encuestadas, 194 se ubicaron en una postura neutral, lo que sugiere que, si bien el servicio es utilizado, no cumple plenamente con las expectativas en términos de calidad, cobertura o eficiencia.

Por otra parte, 181 trabajadores manifestaron estar insatisfechos, reflejando una evaluación negativa del sistema de transporte público, posiblemente asociada a factores como tiempos de espera prolongados, falta de rutas directas, saturación de unidades o limitaciones en los horarios de operación. En contraste, únicamente 28 encuestados indicaron sentirse satisfechos, lo que representa una proporción reducida frente al total de respuestas.

Finalmente, un número marginal de participantes (2 personas) expresó encontrarse muy insatisfecho, lo que, aunque cuantitativamente bajo, refuerza la tendencia general de inconformidad.

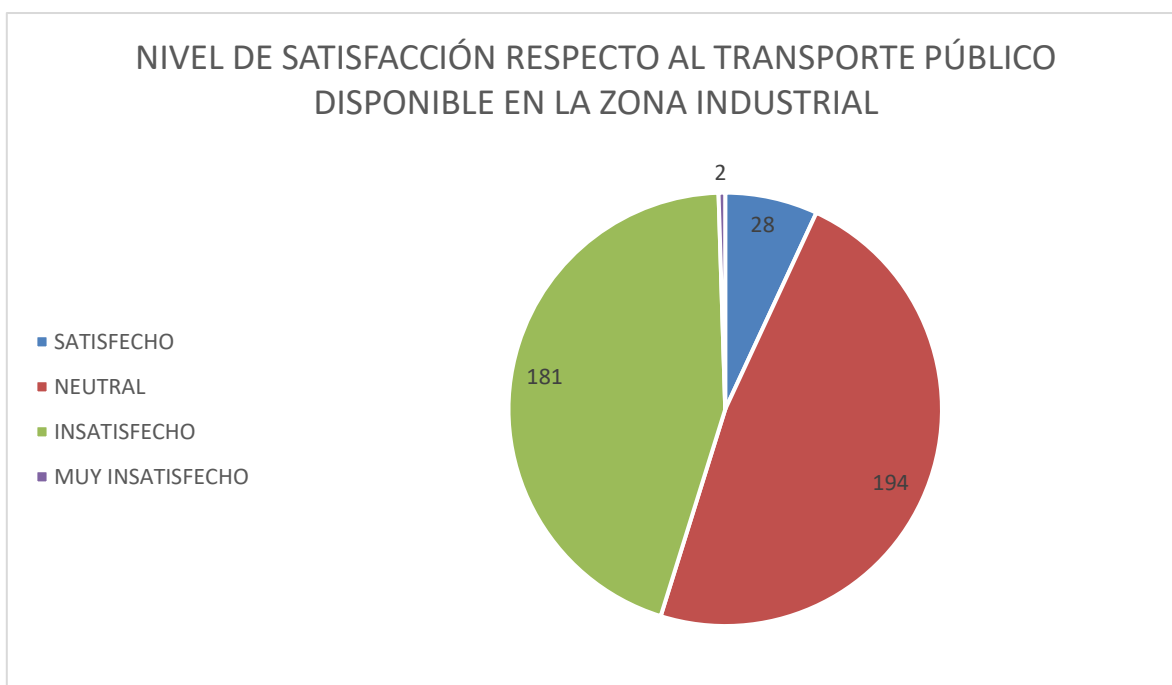


Figura 29. Nivel de satisfacción respecto al transporte público disponible en la Zona Industrial.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta.

Respecto a la pregunta 18. ¿Qué alternativas considera viables para disminuir el congestionamiento vehicular en la Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí?, a partir del análisis de las respuestas abiertas, se identifican cuatro líneas principales de acción que los trabajadores consideran viables para reducir el congestionamiento vehicular en la Zona Industrial de la ciudad de San Luis Potosí.

Las propuestas se repiten de manera consistente, lo que refleja una percepción clara sobre las causas del problema y las posibles soluciones.

En primer lugar, la alternativa más mencionada es la construcción de más vialidades y rutas alternas que conecten a la Zona Industrial, incluyendo el mantenimiento y rehabilitación de las vías existentes, laterales de la carretera 57 y calles secundarias. Las personas encuestadas señalan que la limitada conectividad y el mal estado de la infraestructura vial actual incrementan los tiempos de traslado y generan cuellos de botella, especialmente en horas pico.

En segundo término, destaca de manera reiterada la necesidad de implementar o fortalecer un sistema de transporte masivo, preferentemente de calidad, con mayor cobertura y rutas que ingresen directamente a los parques industriales. Varias respuestas mencionan la ampliación de rutas de autobús, transporte 24/7, e incluso propuestas como metro o transporte exclusivo para trabajadores, con el objetivo de reducir el uso del automóvil particular.

Otra estrategia señalada con frecuencia es alternar o escalonar los horarios de entrada y salida de los centros de trabajo, con el fin de disminuir la concentración de vehículos en periodos específicos del día. Esta medida se considera viable y de bajo costo, especialmente si se coordina entre empresas de la Zona Industrial.

Finalmente, una parte importante de las respuestas hace referencia a proyectos de infraestructura de gran escala, principalmente la construcción de un segundo piso en la carretera 57, así como la ampliación de carriles y la mejora de retornos. Aunque estas propuestas implican mayores inversiones, los encuestados las perciben como soluciones de largo plazo para atender la saturación vial.

De manera complementaria, se mencionan otras alternativas como el fomento al home office, el uso del transporte compartido, la infraestructura ciclista segura, la regulación del transporte pesado, y la mejora de la gestión del tránsito, las cuales, aunque menos frecuentes, aportan una visión integral del problema.

Los resultados de la encuesta muestran una alta disposición de los trabajadores a modificar su medio de transporte en caso de que existieran alternativas de transporte masivo que fueran eficientes, accesibles y económicamente asequibles. De acuerdo con la información obtenida, el 71 % de las personas encuestadas manifestó que sí estaría dispuesta a cambiar su medio de transporte actual, lo que refleja una apertura significativa hacia opciones de movilidad distintas al uso del automóvil particular.

En contraste, el 29 % indicó que no cambiaría su medio de transporte, aun con la disponibilidad de nuevas alternativas, lo cual puede estar asociado a factores como la cercanía entre el domicilio y el lugar de trabajo, la flexibilidad de horarios, la comodidad percibida del vehículo particular o la necesidad de realizar viajes encadenados.

Este resultado es especialmente relevante, ya que sugiere que una proporción importante de los viajes laborales hacia la Zona Industrial podría migrar hacia modos de transporte más sustentables, siempre que estos cumplan con condiciones adecuadas de cobertura, frecuencia, confiabilidad y costo.

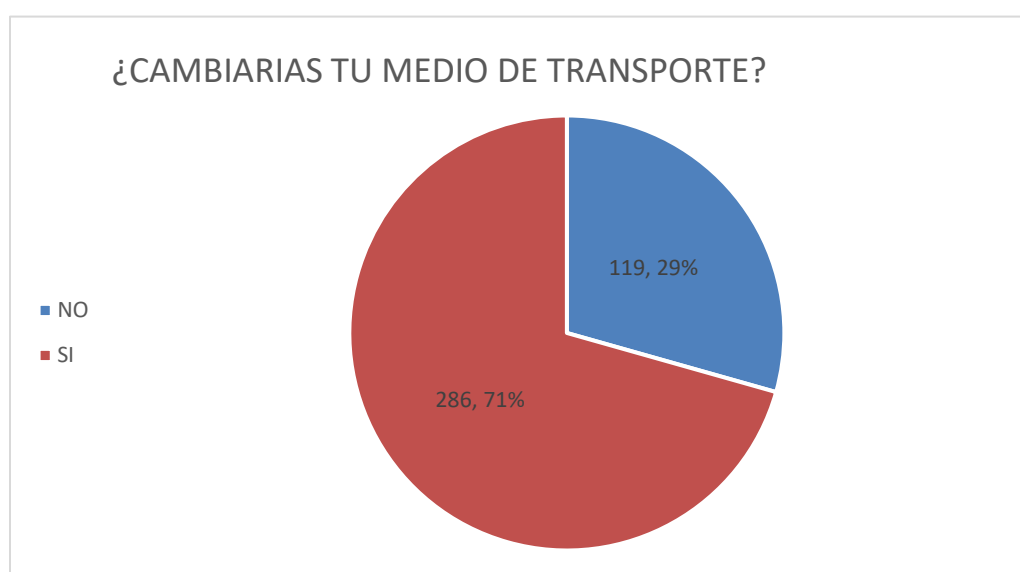


Figura 30. Cambio de la modalidad de transporte de los trabajadores de la Zona Industrial.

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en la encuesta

El análisis de las respuestas abiertas asociadas a esta pregunta permite profundizar en los factores que influyen en la disposición de los trabajadores para modificar su medio de transporte en caso de que existieran alternativas de transporte masivo más eficientes y accesibles. A partir de la información recabada, se identifican diferencias claras entre quienes manifestaron estar dispuestos a realizar el cambio y quienes no lo consideran viable.

En el caso de las personas que respondieron afirmativamente, los principales motivos están relacionados con la posibilidad de reducir costos y mejorar las condiciones del traslado. De manera recurrente, se menciona el ahorro económico como un factor determinante, tanto por la disminución del gasto diario en transporte como por la reducción de otros costos asociados al uso del vehículo particular. Asimismo, varios participantes señalaron que optarían por un transporte colectivo si este ofreciera mayor comodidad y un tiempo de traslado competitivo frente a las opciones actuales.

Otro aspecto relevante entre las respuestas afirmativas es la percepción de beneficios ambientales y urbanos, al reconocer que el uso de transporte colectivo podría contribuir a disminuir el tráfico vehicular y, con ello, los niveles de contaminación. No obstante, en muchos casos la disposición al cambio se presenta de manera condicionada, ya que los encuestados señalan que la decisión dependería de que el servicio ofreciera una adecuada relación entre costo, tiempo de traslado y calidad.

Por el contrario, entre quienes indicaron que no cambiarían su medio de transporte, las razones se vinculan principalmente con limitaciones operativas y de seguridad. Una parte importante de los participantes señaló que el vehículo particular les brinda mayor flexibilidad para atender actividades fuera del horario laboral o realizar trayectos adicionales después de la jornada de trabajo. De igual forma, se mencionan preocupaciones relacionadas con la inseguridad, especialmente en los casos en que es necesario transportar herramientas, equipo de trabajo o mercancía.

También se identifican problemáticas asociadas a la cobertura del transporte público, ya que varios encuestados indicaron que los sistemas actuales llegan únicamente a zonas periféricas de la Zona Industrial, lo que obliga a realizar desplazamientos adicionales para llegar al centro de trabajo. A ello se suma la percepción de que el transporte colectivo implica mayores tiempos de traslado debido a paradas frecuentes, saturación de las unidades o falta de continuidad en el servicio. Finalmente, algunos participantes señalaron que cuentan con transporte proporcionado por la empresa, lo que reduce su interés en buscar alternativas.

En conjunto, las respuestas muestran que la disposición a cambiar de medio de transporte no depende únicamente de la existencia de nuevas opciones, sino de que estas respondan de manera efectiva a las condiciones reales de movilidad de los trabajadores.

Los comentarios adicionales proporcionados por los encuestados refuerzan y amplían los resultados obtenidos en las preguntas cerradas, permitiendo identificar de manera clara las principales problemáticas que afectan la movilidad hacia y desde la Zona Industrial de San Luis Potosí. En términos generales, las opiniones coinciden en que la situación actual es insostenible y que las condiciones de traslado impactan de forma directa en la calidad de vida de los trabajadores.

Uno de los temas que aparece con mayor frecuencia es el deficiente estado de las vialidades, particularmente en la carretera 57, sus laterales y los ejes industriales. Los participantes señalan la presencia constante de baches, hundimientos, falta de mantenimiento y malas condiciones del pavimento, lo que no solo reduce la velocidad de circulación, sino que incrementa el riesgo de accidentes y daños a los vehículos. Esta problemática se intensifica durante la temporada de lluvias, cuando las vialidades se inundan y los desperfectos se vuelven menos visibles, generando mayores congestionamientos.

De manera estrechamente relacionada, se identifica la insuficiencia de vialidades y rutas alternas como uno de los principales factores que originan el tráfico. La mayoría de los encuestados coincide en que la carretera 57 funciona como el único eje de acceso a la Zona Industrial, lo que provoca cuellos de botella constantes, especialmente en horas pico. La falta de conexiones adecuadas entre parques industriales, así como la limitada capacidad de avenidas secundarias, contribuye a que cualquier accidente, cierre parcial o mantenimiento genere retrasos significativos, duplicando o incluso triplicando los tiempos de traslado habituales.

Otro aspecto recurrente en los comentarios es la necesidad de fortalecer el transporte público y el transporte masivo. Los participantes señalan que las rutas existentes son insuficientes, presentan largos tiempos de espera y, en muchos casos, no ingresan directamente a los parques industriales, lo que obliga a realizar traslados adicionales. Asimismo, se menciona que sistemas como MetroRed no cubren la totalidad de la Zona Industrial, lo que limita su utilidad como alternativa real al automóvil particular. En este sentido, varios encuestados consideran que un sistema de transporte masivo eficiente, seguro y con mayor cobertura podría reducir de manera significativa el uso del vehículo privado y, con ello, el congestionamiento vehicular.

La cultura vial y el comportamiento de los conductores también emergen como factores determinantes en la problemática de movilidad. Diversos comentarios hacen referencia a la falta de respeto a los señalamientos, cambios constantes de carril, invasión de carriles centrales por transporte pesado y estacionamientos indebidos, particularmente de tráileres y camiones de carga. Estas prácticas, sumadas a una percepción generalizada de escasa educación vial, incrementan la probabilidad de accidentes y reducen la eficiencia del flujo vehicular, incluso en tramos donde la infraestructura lo permitiría.

Adicionalmente, algunos encuestados destacan la falta de planeación urbana y coordinación institucional, señalando que el crecimiento de la Zona Industrial no ha sido acompañado por una expansión proporcional de la infraestructura vial ni por una definición clara de responsabilidades entre los distintos niveles de gobierno. También se menciona la ausencia de estrategias integrales, como la diversificación de horarios laborales, el fomento al trabajo híbrido o la implementación de transporte interno dentro de los parques industriales, como posibles medidas para reducir la presión sobre las vialidades en horas pico.

Los resultados de la encuesta evidencian que la movilidad hacia y desde la Zona Industrial de San Luis Potosí representa una problemática recurrente para la población trabajadora, principalmente por la concentración de viajes en horarios pico y la alta dependencia del automóvil particular. Esta situación genera congestionamientos constantes, especialmente en la carretera 57, incrementando los tiempos de traslado y afectando de manera directa la calidad de vida de los usuarios.

La información recopilada muestra que el transporte público disponible no satisface plenamente las necesidades de los trabajadores, lo cual se refleja en los bajos niveles de satisfacción y en la limitada cobertura hacia el interior de los parques industriales. A pesar de ello, existe una clara disposición al cambio: la mayoría de los encuestados estaría dispuesta a modificar su medio de transporte si se ofrecieran alternativas masivas que fueran eficientes, seguras y económicamente accesibles.

El gasto diario en transporte y la frecuencia con la que se realizan los viajes refuerzan el impacto económico de esta problemática, particularmente para los trabajadores con menores ingresos. Asimismo, los comentarios cualitativos permiten identificar qué factores como la inseguridad, la falta de conectividad directa, los horarios laborales variables y la necesidad de transportar herramientas o mercancía influyen en la decisión de no abandonar el vehículo particular.

En conjunto, los resultados confirman la necesidad de implementar estrategias integrales de movilidad que prioricen el fortalecimiento del transporte público y masivo, la mejora de la conectividad hacia los parques industriales y la reducción de la congestión en horas pico. Estas acciones no solo contribuirían a mejorar la movilidad urbana, sino que también tendrían un impacto positivo en la reducción de emisiones provenientes de fuentes móviles y en la calidad de vida de los trabajadores.

4.3 ENTREVISTAS A ACTORES INVOLUCRADOS EN LA MOVILIDAD DE LA ZONA INDUSTRIAL.

Con el propósito de complementar los resultados obtenidos mediante la modelación de emisiones por fuentes móviles y el análisis del flujo vehicular en el corredor de la Carretera 57, se realizaron entrevistas semiestructuradas a actores clave relacionados con la movilidad, la gestión ambiental y la operación cotidiana de la Zona Industrial de San Luis Potosí.

Las entrevistas se aplicaron a:

- Arquitecto Enrique García Zermeño, subdirector del Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN) de San Luis Potosí.
- Licenciada Jazmín Alejandra Garza Ramírez, directora de Ecología Urbana (SEGAM).
- Ingeniero Antonio Zúñiga Ávila, dirección de Protección Civil del municipio de Villa de Pozos.
- Ingenieros Martha Sofia González Zago y Eliezer Rachid Gad García Cárdenas, trabajadores y responsables de seguridad, higiene y medio ambiente de empresas dentro de la zona industrial de SLP.

Los resultados presentados en este capítulo permiten comprender la problemática actual desde la perspectiva institucional, operativa y social, lo cual fortalece la evaluación integral del impacto en la calidad del aire en el trayecto industrial de la Carretera 57.

4.3.1 PLANEACIÓN URBANA E INFRAESTRUCTURA DE MOVILIDAD

El subdirector del IMPLAN señaló que, aunque la zona industrial fue concebida como una pieza estratégica para el desarrollo económico del estado, el crecimiento urbano que la rodea ha generado importantes retos de conectividad. De acuerdo con la entrevista, “la conectividad con las zonas habitacionales presenta fallas estructurales debido a la expansión acelerada hacia Villa de Pozos y el sector norte” (Zermeño, 2025).

Asimismo, el funcionario destacó que la Carretera 57 ha superado su capacidad actual de operación, constituyéndose como un corredor saturado con niveles de servicio deficientes. Indicó además que la planeación del transporte público recae en el Gobierno del Estado, lo cual limita la intervención directa del municipio para atender la demanda de movilidad.

Finalmente, se mencionó que, desde hace varias décadas, se ha considerado la creación de una segunda zona industrial en el norte de la ciudad con el fin de distribuir los polos de empleo y reducir la dependencia de un único eje troncal, sin embargo, dicha propuesta no ha logrado consolidarse.

4.3.2 MOVILIDAD Y TRANSPORTE EN LA ZONA INDUSTRIAL

Las entrevistas con personal del IMPLAN y SEGAM coinciden en que la Zona Industrial carece de un sistema de transporte público eficiente, con rutas insuficientes y horarios que no cubren adecuadamente los turnos laborales. El IMPLAN reconoció que “no existe un plan maestro de movilidad metropolitano vigente que articule los diferentes modos de transporte y considere escenarios de mitigación ambiental” (Zermeño, 2025).

SEGAM señaló que la falta de transporte público suficiente obliga a los trabajadores a depender del automóvil particular, lo que incrementa el flujo vial, los tiempos de recorrido y las emisiones.

4.3.3. PERCEPCIÓN DE LOS TRABAJADORES

Los trabajadores entrevistados reportaron tiempos de traslado de entre 45 minutos y 1 hora para llegar a sus centros de trabajo, incluso viviendo dentro del municipio. Uno de ellos mencionó que “el tráfico por las mañanas es constante; hay choques, carriles cerrados y el transporte público pasa muy poco” (Rachid, 2025).

Asimismo, señalaron que las laterales de la carretera y caminos alternos como el Camino a Santa Rita se encuentran en malas condiciones, lo cual ralentiza la circulación y contribuye a la congestión.

Los entrevistados coincidieron en que el transporte público disponible en la zona “no es suficiente ni confiable”, forzando a la mayoría a utilizar vehículo particular.

4.3.4 SEGURIDAD VIAL, RIESGOS Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

La Dirección de Protección Civil de Villa de Pozos identificó que la Carretera 57 presenta accidentes “diarios”, involucrando principalmente vehículos de carga, transporte de personal y automóviles. Al respecto, el director señaló que “los retornos están demasiados lejos y la infraestructura existente no permite una atención rápida de emergencias” (Zúñiga, 2025).

Entre los puntos críticos se destacaron:

- El acceso a los fraccionamientos Lagos.
- El cruce frente a La Pila.
- El eje cercano al seminario.

Protección Civil también reconoció que existe una limitada preparación para la atención de incidentes con materiales peligrosos y que aún no se cuenta con un plan integral de contingencias para eventos asociados a emisiones o mala calidad del aire.

4.3.5 CALIDAD DEL AIRE Y EMISIONES POR FUENTES MÓVILES

SEGAM indicó que los principales contaminantes asociados con la movilidad en la zona industrial son el PM_{10} y, en menor medida, el $PM_{2.5}$, derivados principalmente de la circulación de vehículos pesados y del estado de las vialidades.

Aunque actualmente no existe una estación de monitoreo situada dentro de la zona industrial, las lecturas de la estación cercana de Soledad de Graciano Sánchez muestran episodios en los que los niveles de PM_{10} exceden los valores recomendados. SEGAM señaló: “el vehículo de carga y el transporte público son los principales emisores detectados en la zona” (Garza, 2025).

Asimismo, se mencionó que no existe un inventario actualizado de emisiones móviles a nivel estatal o municipal, aunque se están iniciando los trabajos para la reactivación del programa de verificación vehicular y la elaboración del PROAIRE estatal.

Los trabajadores entrevistados mencionaron que, aunque no siempre son perceptibles los niveles de contaminación, sí observan emisiones visibles provenientes de tractocamiones, pipas y vehículos pesados en mal estado mecánico. Uno de ellos comentó que “las pipas de drenaje y los tractocamiones viejos contaminan demasiado, se ve cuando pasan” (Rachid, 2025).

4.3.6 SÍNTESIS DE HALLAZGOS

El análisis transversal de las entrevistas permitió identificar problemáticas estructurales que influyen directamente en la calidad del aire del corredor industrial:

- Saturación del corredor 57

La infraestructura vial no corresponde al volumen actual de vehículos, lo que genera velocidades bajas, mayor tiempo de operación y aumento de emisiones.

- Insuficiencia del transporte público

La falta de rutas y frecuencia provoca dependencia del vehículo particular, lo que incrementa exponencialmente las emisiones móviles.

- Ausencia de monitoreo directo

No existe una estación de monitoreo a la calidad del aire en la zona industrial, lo que limita la evaluación puntual de los contaminantes generados por el flujo vehicular.

- Riesgos elevados y falta de protocolos

La atención de emergencias está limitada por la infraestructura, la distancia de retornos y la falta de procedimientos especializados para materiales peligrosos.

- Coincidencia entre instituciones, trabajadores y empresas

Todos los entrevistados consideran necesaria la implementación de:

- Vías alternas
- Mejoras al transporte público
- Planeación metropolitana
- Estrategias de movilidad sustentable
- Regularización vehicular
- Monitoreo constante de la calidad del aire

Las entrevistas realizadas revelan que la problemática de movilidad en la Zona Industrial de San Luis Potosí no solo afecta la eficiencia del transporte y el tiempo de traslado de los trabajadores, sino que constituye un factor determinante en la generación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles.

La falta de infraestructura adecuada, la insuficiencia del transporte público, la saturación de la Carretera 57 y la ausencia de monitoreo especializado conforman un escenario complejo que requiere acciones integrales. Estas perspectivas fortalecen los hallazgos técnicos obtenidos mediante la modelación de emisiones y confirman la urgencia de un enfoque metropolitano de movilidad sustentable que permita disminuir el impacto ambiental en el corredor industrial.

4.4 ANALISIS ESPACIAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al tramo de la carretera federal 57 que atraviesa la Zona Industrial de San Luis Potosí, específicamente entre el entronque con el Libramiento y la av. colorines, tal como se aprecia en la Figura 31. Este segmento concentra una proporción importante de los desplazamientos diarios vinculados con las actividades productivas y logísticas de la región, convirtiéndose en un corredor clave dentro de la movilidad metropolitana.

En esta sección, la carretera 57 desempeña una doble función. Por un lado, actúa como vía federal de largo alcance, facilitando el tránsito regional y el transporte de mercancías; por otro, se comporta como arteria urbana al absorber los viajes cotidianos de trabajadores que se dirigen hacia la Zona Industrial o regresan de ella. La coincidencia de estas dinámicas genera una elevada presión vehicular, particularmente en los horarios de entrada y salida laboral, cuando confluyen automóviles particulares, transporte público y unidades de carga pesada.

El estudio del nivel de servicio permite precisar las condiciones de operación del corredor. Según el mapa mostrado en la Figura 31, los tramos periféricos de la red vial metropolitana registran, en general, niveles A, B, C y D que reflejan circulación fluida o estable. En contraste, el segmento de la carretera 57 que cruza la Zona Industrial presenta predominantemente nivel F, lo que evidencia saturación, inestabilidad en el flujo y congestión recurrente.

La presencia de niveles de servicio bajos en esta sección se explica por la alta concentración de accesos a parques industriales, la existencia de intersecciones con vialidades secundarias y distribuidores, además de la intensa actividad económica del entorno inmediato. Estos factores disminuyen la capacidad efectiva de la vía y generan condiciones críticas de operación, sobre todo en los periodos de mayor demanda.

Desde el punto de vista ambiental, las condiciones detectadas en el tramo son particularmente relevantes. El nivel de servicio F implica recorridos más prolongados, detenciones frecuentes, arranques constantes y variaciones significativas en la velocidad de circulación. Todo ello incrementa el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles, convirtiendo a la carretera 57, en su paso por la Zona Industrial, en un punto crítico tanto para la movilidad urbana como para la calidad del aire.

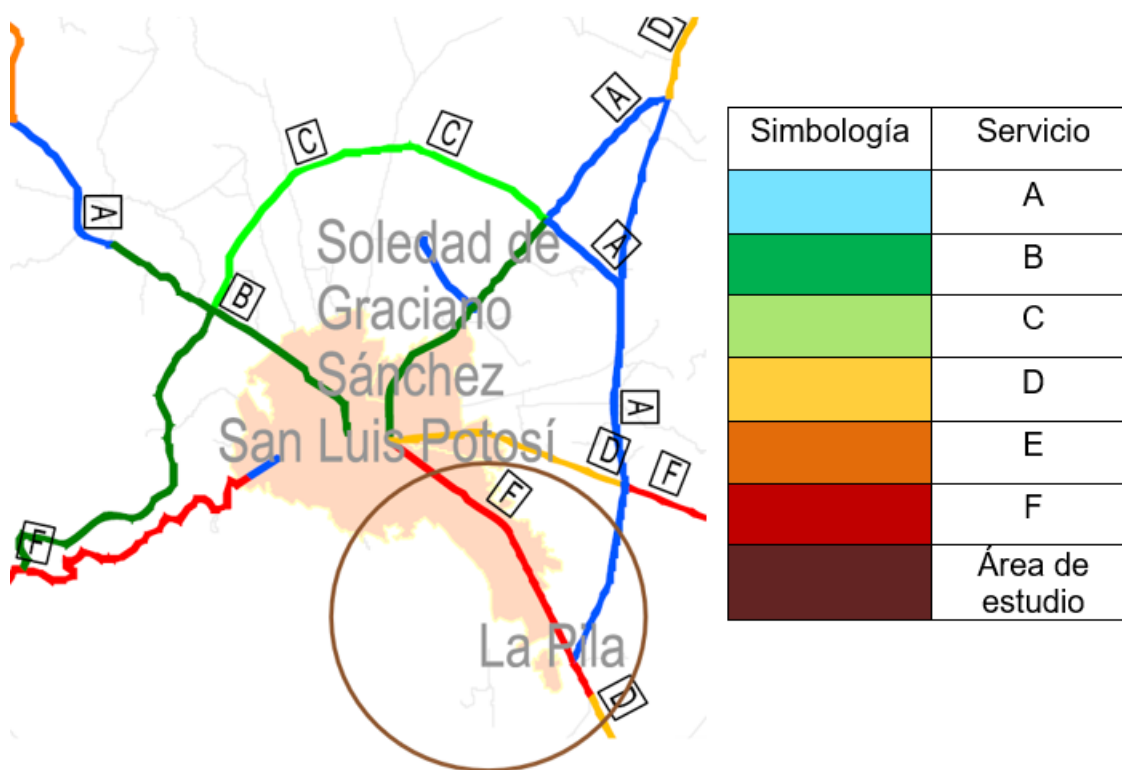


Figura 31. Mapa de nivel de servicio de la zona de estudio.

Fuente: Niveles de servicio (SCT, 2023).

De acuerdo con la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), la distribución espacial de estas actividades evidencia un patrón claramente alineado con los principales corredores viales de la ciudad, siendo la Zona Industrial el núcleo con mayor densidad de establecimientos.

En la figura 32, se observa que las unidades económicas asociadas a actividades de fabricación, especialmente aquellas relacionadas con productos metálicos, maquinaria y equipo, industrias metálicas básicas, industria química y fabricación de productos a base de minerales no metálicos, se concentran de manera predominante en el sector sur y sureste de la mancha urbana, coincidiendo con el trazo de la carretera 57 y sus vialidades de acceso. Esta concentración no es aleatoria, sino que responde a la necesidad de conectividad logística y disponibilidad de infraestructura vial para el transporte de insumos y productos terminados.

Asimismo, se identifica una presencia significativa de industrias de apoyo, como la industria alimentaria, textil y de madera y papel, las cuales, si bien presentan una distribución más dispersa dentro del área metropolitana, también mantienen una relación funcional con la Zona Industrial. Esta configuración territorial genera una fuerte dependencia de la carretera 57 como principal eje articulador de los desplazamientos laborales, logísticos y de servicios.

La elevada concentración de unidades económicas en este corredor explica, en gran medida, los altos volúmenes de tránsito observados en el tramo de estudio, así como las condiciones de operación vial previamente identificadas mediante el análisis del nivel de servicio. La coincidencia espacial entre la mayor densidad industrial y los tramos con niveles de servicio F refuerza la idea de que la congestión vehicular en la carretera 57 no responde únicamente al crecimiento del parque vehicular, sino también a la estructura territorial y funcional de la ciudad.

Desde el punto de vista de la movilidad, esta configuración implica que una proporción considerable de los viajes diarios tenga como destino u origen la Zona Industrial, concentrándose en horarios específicos asociados a los turnos laborales. Esta dinámica incrementa la presión sobre la infraestructura vial existente y favorece condiciones de circulación intermitente.

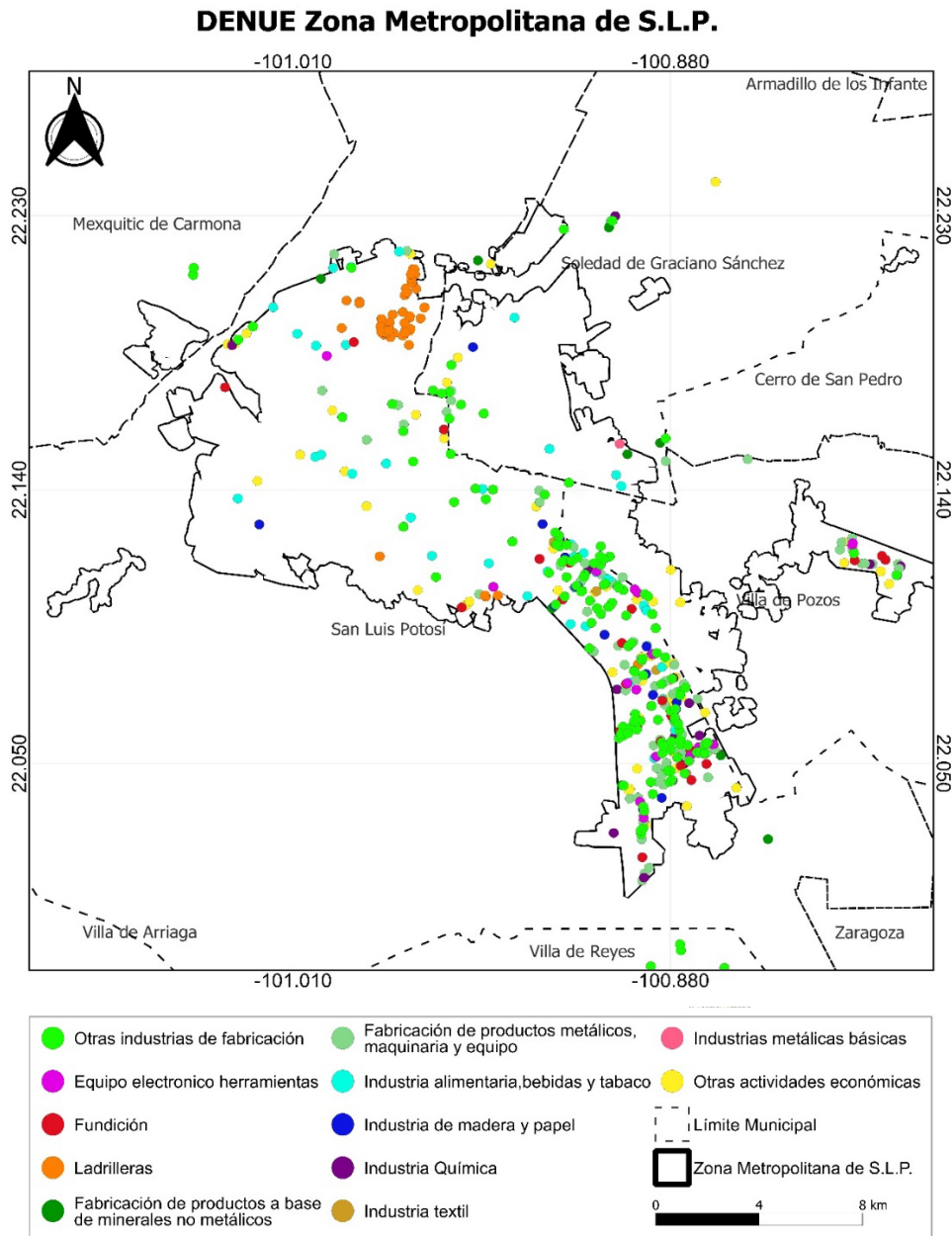


Figura 32. Denué Zona metropolitana de SLP.

Fuente: Elaboración propia con datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2024).

El análisis espacial de la accesibilidad a la Zona Industrial de San Luis Potosí evidencia una marcada desigualdad en los tiempos de traslado entre las distintas zonas urbanas. En la figura 33, se puede observar que las áreas con mayor cercanía a los parques industriales, particularmente las zonas 5 y 6, presentan los menores tiempos de recorrido, generalmente inferiores a 20 minutos, lo cual se relaciona con su proximidad física y una conectividad vial más directa.

En contraste, las zonas ubicadas al norte y poniente de la ciudad, especialmente las zonas 1, 3 y 4, registran tiempos de traslado considerablemente mayores, que superan los 40 minutos y, en algunos casos, alcanzan más de una hora. Esta situación refleja una alta dependencia de la carretera 57 como principal eje de acceso, lo que vuelve al sistema de movilidad vulnerable ante congestionamientos, accidentes o labores de mantenimiento.

Por su parte, los parques industriales localizados al sur, en los municipios de Villa de Pozos y Villa de Reyes, presentan condiciones de accesibilidad intermedia, con tiempos de recorrido predominantes entre 20 y 40 minutos. Sin embargo, estas zonas enfrentan limitaciones importantes debido a la falta de vialidades alternas y a una cobertura insuficiente del transporte público, lo que refuerza el uso del vehículo particular como principal medio de desplazamiento.

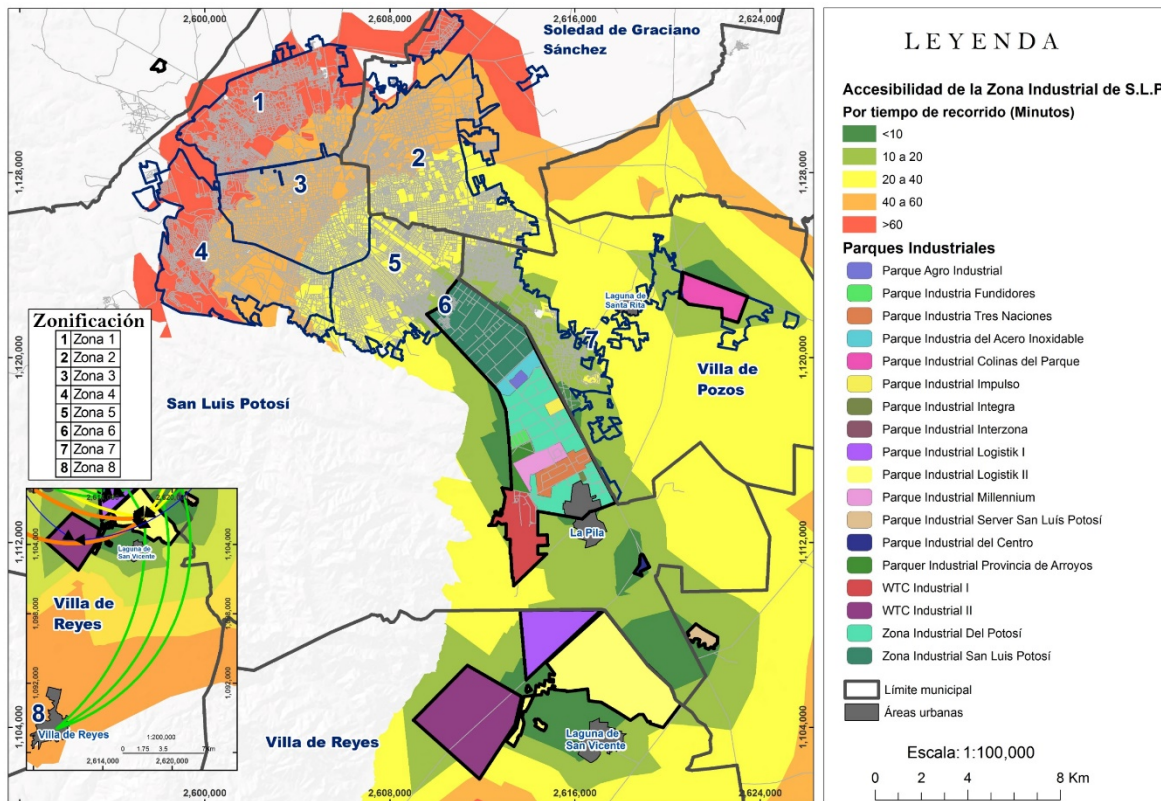


Figura 33. Mapa de accesibilidad de Zona metropolitana con la zona industrial de SLP.

Fuente: Elaboración propia.

El mapa de flujos de movilidad confirma lo expresado por los trabajadores en la encuesta, al mostrar que la carretera 57 continúa siendo el corredor prácticamente obligatorio para acceder a la Zona Industrial. La mayor parte de los desplazamientos se concentran en un eje norte-sur, sin alternativas reales que permitan distribuir el tránsito de manera más eficiente.

En la figura 34, se observa que las zonas 2, 3 y 5 destacan como los principales puntos de origen de los viajes, lo que coincide con áreas urbanas de alta densidad poblacional. Desde estas zonas se generan los flujos más intensos hacia los parques industriales, lo que explica la saturación recurrente del corredor en los horarios de entrada y salida laboral. Asimismo, la concentración de viajes hacia parques industriales específicos incrementa la presión sobre una infraestructura vial limitada, haciendo que cualquier incidente, lluvia o cierre parcial provoque congestionamientos severos, tal como fue señalado de manera reiterada por los encuestados.

En conjunto, el análisis espacial y los resultados de la encuesta muestran que la movilidad hacia la Zona Industrial de San Luis Potosí se caracteriza por una fuerte concentración de flujos, una alta dependencia de la carretera 57 y una limitada oferta de alternativas viales y de transporte público. Esta configuración territorial genera desigualdades en los tiempos de traslado, incrementa la congestión vehicular y contribuye al aumento de emisiones contaminantes asociadas a las fuentes móviles, evidenciando la necesidad de una planeación integral de la movilidad en la zona de estudio.

Si bien el análisis espacial realizado es de carácter descriptivo–interpretativo, permite identificar con claridad los principales patrones territoriales que condicionan la movilidad hacia la Zona Industrial. La combinación de tiempos de recorrido, zonificación urbana y flujos de movilidad constituye una base suficiente para evidenciar la dependencia estructural de la carretera 57 y la ausencia de una red vial jerarquizada. Estos resultados ofrecen un soporte espacial sólido para el análisis posterior de emisiones contaminantes por fuentes móviles, al identificar las áreas y corredores donde se concentran los mayores tiempos de desplazamiento y, por ende, las mayores condiciones de emisión.

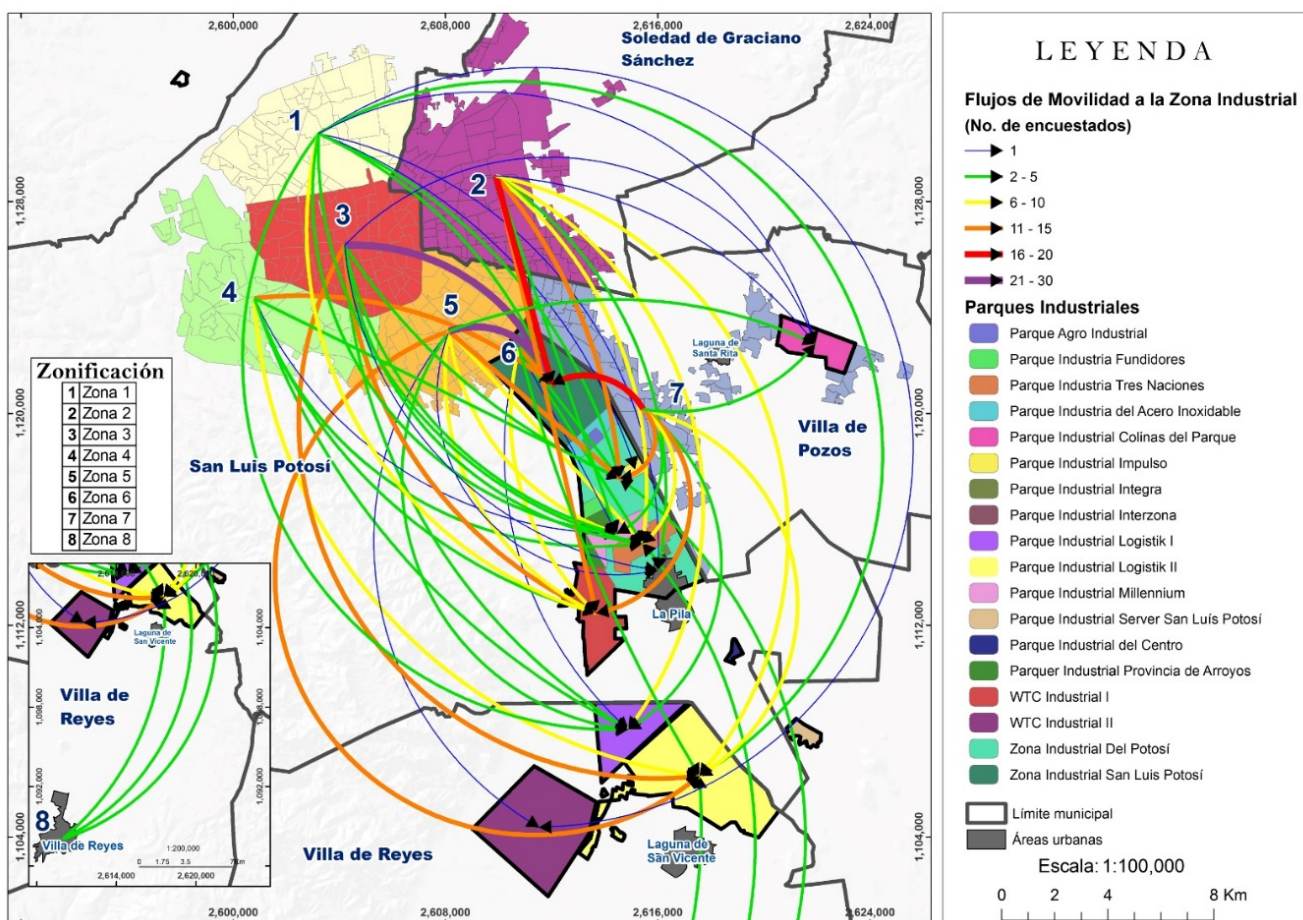


Figura 34. Mapa de flujos de la encuesta realizada.

4.5 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio permiten analizar de manera integral la relación entre el crecimiento del parque vehicular, las condiciones de movilidad y la generación de emisiones contaminantes por fuentes móviles en el tramo de la carretera 57 correspondiente a la Zona Industrial de San Luis Potosí. La integración de información cuantitativa y cualitativa aporta una comprensión amplia de la problemática, más allá de un análisis exclusivamente técnico.

El inventario de emisiones teórico muestra un incremento significativo en las emisiones de contaminantes entre los años 2016 y 2023, particularmente de CO₂, PM_{2.5} y carbono negro. Este comportamiento se encuentra estrechamente vinculado al aumento del tránsito diario promedio anual, el cual prácticamente se duplicó en el periodo analizado. Dicho crecimiento evidencia que la demanda de movilidad ha superado la capacidad de la infraestructura vial existente, generando condiciones de congestión que favorecen mayores emisiones por unidad de recorrido.

El análisis por tipo de combustible y categoría vehicular indica que, si bien los automóviles particulares representan el mayor volumen del tránsito, los vehículos de carga y transporte pesado tienen una contribución relevante en la emisión de contaminantes, especialmente aquellos asociados a la combustión diésel. Esta situación resulta particularmente crítica en un corredor industrial donde el transporte de mercancías es constante y se realiza en horarios que coinciden con los desplazamientos laborales, intensificando la saturación vial.

Los resultados de las encuestas origen–destino refuerzan este diagnóstico, al evidenciar una alta dependencia del automóvil particular como principal medio de transporte hacia la Zona Industrial. La limitada cobertura, frecuencia y confiabilidad del transporte público obliga a los trabajadores a optar por el vehículo privado, lo que incrementa el número de viajes motorizados y, por ende, la generación de emisiones. Además, los tiempos de traslado reportados, especialmente durante las horas pico, reflejan condiciones de circulación ineficientes que incrementan el consumo de combustible y la emisión de contaminantes.

El análisis espacial muestra una concentración de los flujos de viaje en determinadas zonas urbanas, lo que provoca una carga desigual sobre la infraestructura vial. Esta concentración, sumada a la escasa disponibilidad de rutas alternas, consolida a la carretera 57 como el eje casi exclusivo de acceso a la Zona Industrial. En consecuencia, cualquier perturbación en este corredor ya sea accidentes, obras o condiciones climáticas adversas genera congestionamientos severos, con impactos directos en la movilidad y en la calidad del aire.

Las entrevistas con actores involucrados aportan una dimensión cualitativa que permite contextualizar los resultados técnicos. Tanto autoridades como trabajadores y representantes del sector productivo coinciden en señalar la insuficiencia de la infraestructura vial, la falta de transporte público eficiente y la ausencia de monitoreo ambiental específico en la zona industrial como factores estructurales del problema. Asimismo, se reconoce que la falta de información actualizada sobre emisiones móviles limita la capacidad de diseñar e implementar políticas efectivas de mitigación.

En conjunto, los resultados evidencian que la problemática de la calidad del aire en la Zona Industrial de San Luis Potosí no puede entenderse de manera aislada, sino como el resultado de un modelo de movilidad altamente dependiente del vehículo particular, una planeación urbana fragmentada y una infraestructura vial que no ha evolucionado al mismo ritmo que el crecimiento industrial y poblacional.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El desarrollo de este estudio permitió analizar el impacto que tiene la movilidad vehicular sobre la calidad del aire en el tramo de la carretera 57 que atraviesa la Zona Industrial de San Luis Potosí, a partir de un enfoque teórico de estimación de emisiones y del análisis de los patrones de desplazamiento de los trabajadores.

El cálculo teórico de las emisiones generadas por fuentes móviles mostró un incremento significativo entre 2016 y 2023, coherente con el crecimiento observado en la dinámica vehicular del corredor. En 2016, el tránsito diario promedio anual (TDPA) en el tramo de estudio fue de 48,585 vehículos, mientras que para 2023 ascendió a 100,133 vehículos, lo que representa un aumento superior al 100 % en el periodo analizado. De manera paralela, el parque vehicular estatal pasó de 1,074,426 a 1,476,277 unidades, evidenciando una expansión sostenida de la motorización en la entidad. Asimismo, el porcentaje de vehículos del total estatal que atraviesan la carretera 57 en su paso por la Zona Industrial se incrementó de 4.5 % a 6.8 %, lo que confirma una mayor concentración de flujos en este corredor estratégico.

Por otro lado, el análisis de las encuestas origen–destino permitió identificar con claridad las principales variantes de movilidad de los trabajadores de la Zona Industrial. Los resultados evidencian una alta dependencia del automóvil particular, asociada principalmente a la insuficiencia del transporte público y a la concentración de los viajes en horarios específicos de entrada y salida laboral. Esta dinámica se traduce en mayores tiempos de traslado, congestión recurrente y un incremento en el consumo de combustible, lo que a su vez intensifica la generación de emisiones contaminantes.

Asimismo, el análisis espacial y la información cualitativa obtenida a través de las entrevistas muestran que la movilidad hacia la Zona Industrial se encuentra fuertemente condicionada por la falta de rutas alternas y por una planeación urbana que no ha acompañado el crecimiento industrial de la ciudad. La dependencia casi exclusiva de la carretera 57 como eje de acceso refuerza un modelo de movilidad poco eficiente y ambientalmente insostenible.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la problemática de la calidad del aire en la Zona Industrial de San Luis Potosí no puede abordarse de manera aislada, sino que está estrechamente vinculada al modelo actual de movilidad. La ausencia de opciones de transporte masivo y colectivo eficientes ha favorecido el uso intensivo del vehículo particular, con consecuencias directas tanto en la congestión vial como en la generación de emisiones por fuentes móviles.

5.2 RECOMENDACIONES

A partir del análisis de las emisiones generadas por fuentes móviles en la carretera 57, de la caracterización de los patrones de movilidad de los trabajadores de la Zona Industrial y de la información cualitativa recabada mediante encuestas, se identifican diversas líneas de acción que permitirían mejorar la movilidad urbana y reducir el impacto ambiental asociado al transporte en esta zona de la ciudad.

En primer lugar, resulta indispensable priorizar el mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura vial existente. El deterioro histórico de las laterales de la carretera 57, de los ejes industriales y de avenidas estratégicas no solo ha afectado la seguridad vial, sino que también ha contribuido a la reducción de velocidades de operación, al incremento de tiempos de recorrido y a la generación de congestionamientos recurrentes. Actualmente se realizan trabajos de rehabilitación en las laterales por parte del gobierno estatal y en los carriles centrales bajo la responsabilidad de la autoridad federal; no obstante, persiste la necesidad de ampliar estas intervenciones, particularmente en el tramo comprendido entre el Eje 120 y Eje 140, donde continúan presentándose condiciones de deterioro y alta presión vehicular.

De manera complementaria, resulta necesario avanzar hacia una diversificación efectiva de las opciones viales de acceso y salida a la Zona Industrial. La dependencia predominante de la carretera 57 como corredor principal vuelve al sistema altamente vulnerable ante accidentes, eventos climatológicos o trabajos de mantenimiento. Si bien existe una vialidad alterna que conecta a la altura del Eje 122, su capacidad actual y cobertura resultan insuficientes para absorber la demanda vehicular, por lo que la carretera continúa concentrando un volumen elevado de tránsito. En este contexto, la planeación y habilitación de nuevas rutas, junto con la mejora de la conectividad entre parques industriales y zonas habitacionales, permitiría distribuir de manera más equilibrada los flujos vehiculares y reducir los puntos críticos de saturación.

En relación con la movilidad laboral, se considera prioritario fortalecer el transporte público y colectivo como una alternativa real al uso del automóvil particular. Esto implica no solo incrementar el número de rutas y su cobertura territorial, sino también mejorar la frecuencia, la calidad del servicio y la percepción de seguridad. Ampliar la cobertura de sistemas existentes como MetroRed. Un sistema de transporte público confiable y eficiente puede contribuir de manera significativa a disminuir la demanda vehicular en horas pico, lo cual tendría efectos directos en la reducción de emisiones y en la mejora de la calidad del aire.

Asimismo, se recomienda evaluar la implementación de sistemas de transporte masivo de mayor capacidad, diseñados específicamente para atender los desplazamientos hacia la Zona Industrial. Este tipo de soluciones debe considerar la localización real de los centros de empleo, los horarios laborales y la demanda efectiva de los usuarios, evitando enfoques fragmentados o de corto plazo que no resuelvan el problema estructural de la movilidad.

Otra línea de acción relevante es la gestión de la demanda de viajes, particularmente mediante la coordinación de horarios de entrada y salida en los parques industriales. La concentración de viajes en periodos muy específicos intensifica el congestionamiento y reduce la eficiencia del sistema vial. La adopción de esquemas escalonados, así como la promoción de modalidades como el

transporte empresarial, el uso compartido del automóvil o esquemas de trabajo híbrido, podría contribuir a una distribución más homogénea de los flujos de tránsito.

Resulta fundamental fortalecer la generación y actualización de inventarios de emisiones por fuentes móviles, utilizando información local y datos de actividad vehicular representativos. Contar con este tipo de herramientas permitiría dar seguimiento a la evolución de las emisiones y apoyar la toma de decisiones en materia de movilidad y calidad del aire.

Por último, se considera necesario fortalecer la regulación y gestión del tránsito, especialmente en lo referente al transporte pesado, el uso adecuado de carriles, el estacionamiento en vía pública y la atención oportuna de incidentes viales. Una mayor coordinación institucional, acompañada de acciones de educación vial y de aplicación efectiva del reglamento de tránsito, permitiría reducir la frecuencia de accidentes y mejorar la operación general del corredor.

En conjunto, estas recomendaciones apuntan a la necesidad de una estrategia integral de movilidad urbana sostenible, en la que la reducción de emisiones, la eficiencia del transporte y la calidad de vida de los trabajadores se aborden de manera simultánea. Atender de forma aislada alguno de estos elementos limitaría el alcance de las acciones; por el contrario, una visión articulada permitiría avanzar hacia un sistema de movilidad más funcional y ambientalmente responsable en la Zona Industrial de San Luis Potosí.

6. BIBLIOGRAFÍA.

1. Amato, F., Pandolfi, M., Escrig, A., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., ... & Moreno, T. (2014). Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2. *Atmospheric Environment*, 43(17), 2770-2780.
2. Aranda, D. (2021). Zona industrial de San Luis Potosí, la bujía del desarrollo. *El Sol de San Luis | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, San Luis Potosí y el Mundo*. Recuperado el 10 de noviembre de 2023. <https://www.elsoldesanluis.com.mx/finanzas/mercados/suplemento-industrial-oem-zona-industrial-de-san-luis-potosi-la-bujia-del-desarrollo-6949174.html>
3. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2024). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*.
4. EPA (2016). "Overview: Pollutants and Programs. Mobile Source Air Toxics". Recuperado del 26 de octubre del 2023. <https://www3.epa.gov/otaq/toxics.htm>
5. EPA (2020). Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide. U.S. Environmental Protection Agency.
6. EPA (2020). Mobile Source Air Toxics. U.S. Environmental Protection Agency.
7. EPA. (2020). Understanding Air Pollution: What It Is and How It Affects Your Health. United States Environmental Protection Agency. Recuperado de <https://www.epa.gov>
8. European Environment Agency (EEA). (2019). Emission inventory guidebook 2019. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.
9. European Environment Agency EEA (15 de octubre del 2023). Emisiones de vehículos y eficiencia. <https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/infografia/emisiones-de-vehiculos-y-eficiencia/view>

10. Garg, B. D., Cadle, S. H., Mulawa, P. A., & Grosjean, D. (2000). Brake wear particulate matter emissions. *Environmental Science & Technology*, 34(21), 4463-4469.
11. Gutiérrez Chaparro, J. J. (2012). Planeación, participación y gestión de los procesos urbanos actuales. Una visión Iberoamericana. México: Universidad Autónoma del Estado de México. Fecha de consulta 27 de octubre del 2023.
12. HEI (2019). State of Global Air 2019. Health Effects Institute.
13. Hernández-Gerónimo, Guadalupe, Laines-Canepa, José Ramón, Ávila-Lázaro, Israel, Solís-Silvan, Rudy, & Sosa-Olivier, José Aurelio. (2022). CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DE FACTORES DE EMISIÓN PARA ESTIMAR EMISIONES FUGITIVAS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN UN CENTRO DE ACOPIO DE RESIDUOS SÓLIDOS. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 38, 54024. Recuperado el 09 de diciembre de 2023. <https://doi.org/10.20937/rica.54024>
14. INECC y Semarnat. Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC y Semarnat. México. 2018.
15. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). (2020). Análisis de flujos de carga y seguridad vial en los corredores comerciales del norte de México. Querétaro, México: Publicación Técnica No. 582.
16. Instituto Mexicano del Transporte. (2010). Manual estadístico del sector transporte 2010. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
17. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). Inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio. Ciudad de México: INECC.
18. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Indicador mensual de la actividad industrial por entidad federativa (IMAIEF), abril 2023. Comunicado de prensa núm. 471/23. INEGI. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/imaief/imaief2023_08.docx

19. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
20. "Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí. INEGI.
21. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807078>
22. "Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), edición noviembre 2024. INEGI.
23. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
24. "Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2: Energy. Institute for Global Environmental Strategies.
25. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
26. IPCC (2021). Sixth Assessment Report: Climate Change 2021. Intergovernmental Panel on Climate Change.
27. Jones, M. (2019). Air Quality and Emission Inventories: A Practical Guide. Environmental Science Journal.
28. Organización de las Naciones Unidas (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial. Recuperado el 02 de diciembre de 2023. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*bkx07g*_ga*MTE5OTI3NDYyNy4xNzAyNjY5NDc2*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcwNDgyMTEzNC41LjEuMTcwNDgyMTE5NC4wLjAuMA.
29. Organización de las Naciones Unidas. (2015). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Recuperado el 02 de enero del 2024. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#>
30. Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling Transport (4th ed.). West Sussex, UK: John Wiley & Sons.

31. Rodríguez, L., & Pérez, G. (2020). Comparative Analysis of Emission Inventory Methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
32. Rodríguez, M. d., López, J., y Vela, G. (2011). Calidad de suelos para el aprovechamiento de la Sierra de Guadalupe. A. G. Aguilar, & I. Escamilla, *Periurbanización y sustentabilidad en grandes ciudades*. 343-369. México, D.F. Fecha de consulta 28 de octubre del 2023.
33. Romero Placeres M., Más Bermejo P., Lacasaña Navarro M., Téllez Rojo Solís MM., Aguilar Valdés J., y Romieu I. (2004). Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad de La Habana. *Salud Pública México*, (46), 222-3. Fecha de consulta: 12 de octubre del 2023.
34. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1992). Centro de Documentación y Mapoteca. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <https://www.sct.gob.mx/planeacion/centro-de-documentacion-y-mapoteca/>
35. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2023). Datos viales 2023. https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos_Viales_2023/24_SLP_DV2023.pdf. Recuperado el 10 de marzo de 2024.
36. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2024). Datos viales 2024. https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos_Viales_2024/24_SLP_DV2024.pdf. Recuperado el 10 de marzo de 2024.
37. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2022). Datos viales y estudios de tránsito en la red federal de carreteras. Gobierno de México.
38. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). (2022). Estudio de origen-destino y peso de carga en la Carretera Federal 57. Gobierno de México.
39. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). Programa para mejorar la calidad del aire en las entidades federativas. Ciudad de México: SEMARNAT.

40. Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública. (2023). San Luis Potosí: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública | Data México. (s. f.). Recuperado el 06 de diciembre de 2023.
41. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics*. Wiley.
42. Smith, J., Brown, R., & Thompson, P. (2018). Regional Variability in Emission Factors. *Journal of Air Pollution Control*.
43. Sternbeck, J., Sjödin, Å., & Andréasson, K. (2002). Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies. *Atmospheric Environment*, 36(30), 4735-4744.
44. Thorpe, A., & Harrison, R. M. (2008). Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of the Total Environment*, 400(1-3), 270-282.
45. Transportation Research Board. (2016). *Highway Capacity Manual* (6th ed.). Washington, DC: National Academies Press.
46. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2016). Basic information about emissions inventories. Recuperado de <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/basic-information-about-emissions-inventories>.
47. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) user guide. Recuperado de <https://www.epa.gov/moves/moves2018-user-guide>.
48. Unión Internacional de Transporte Público (UITP). (2020). Definición de movilidad. <https://www.uitp.org/>
49. Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). (2021). Impacto de la movilidad industrial en el desarrollo urbano sostenible de ciudades medias. Querétaro, México: Facultad de Ingeniería.
50. Universidad Autónoma de San Luis Potosí & Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (2018). Inventario de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero del Estado de San Luis Potosí. En Informe final del proyecto: Evaluación de la fracción orgánica presente en las partículas

atmosféricas en el estado de San Luis Potosí y su impacto en el cambio climático y la salud pública.

51. Villar Calvo, A. J. (2023). Estrategias de Nearshoring y el impacto en la infraestructura carretera del Bajío. *Revista de Logística y Comercio Exterior*, 12(2), 45-62.